Г. Бурмин
Штурм абсолютного нуля

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Книга о том, как физики, проникнув в область температур вблизи абсолютного нуля, открыли замечательное свойство вещества — сверхпроводимость. В ней рассказывается о выдающемся достижении современной физики — высокотемпературной сверхпроводимости, о применении сверхпроводников в технике и промышленности, об ученых — творцах этой области науки.

- ШТУРМ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ
  -
  - 1. Почему «обидели» температуру? Ошибка Фаренгейта. Порядок и беспорядок. Когда путь вниз труднее подъема. Ледяной кипяток. Существуют ли на Земле «холодные жидкости»?
  - 2. Читатель узнает, что и пенсы могут служить науке. Что скрывалось за «грязью» в сосуде. Две тысячи метров под водой. Последствие одной аварии. Привидение, которое не возвращается.
  - 3. «Призрак» превращается в реальность. Скрипка Дьюара. Сюрприз на финишной прямой. Последняя крепость взята! Окно в мир сверхпроводимости.
  - 4. Как измерить «ничего». Вечное движение. Привередливые сверхпроводники. «Гроб Магомета». Заколдованный круг.
  - 5. Загадки жидкого гелия. Невидимка оставляет мокрые следы. Рассерженные змеи. Двуликий Янус. Есть вязкость, и нет вязкости. Современный рог изобилия.
  - 6. Арифметика на песке. Окно в мир квантовой механики. Удивительные законы мира невидимок. Путешествие в отцепленном вагоне. Тепло отделяется от материи. Еще одна загадка.
  - 7. История с почти детективным началом. Загадка века. Ионы и электроны. Невидимка находит напарника. Строем сквозь кристалл. Вопросы без ответа.
  - 8. Вихри в сверхпроводнике. Металлы и сплавы. Медь становится изолятором. Нужно ли «дразнить» сверхпроводник. Как ученые закрыли энергетическую щель.
  - 9. Сигналы из космоса. «Маленькие зеленые

человечки». Когда молчание — золото. Рождение нейтронной звезды. Небесное тело на лабораторном столе.
    - 10. Скафандры для сверхпроводников. В плену у гелиевых температур. О лягушке, полимерах и металлическом водороде. Синица в руках или журавль в небе? Двойная сенсация.
    - 11. «Возвращение каменного века». Ученые из Цюриха начинают «… выигрывают. Магические цифры. Три кита, на которых держится сверхпроводимость.
    - 12. Ученик чародея. Непокорная плазма. Династия Токамаков. Подземный склад энергии. Необычное озеро. Летающий поезд. Новейший ускоритель
    - 13. «Разумный» сверхпроводник. Сквозь глухую стенку. Сюрпризы туннельного контакта. Вверх по шкале точности. Необычные воздухоплаватели.
- notes
    - 1
    - 2
    - 3
    - 4
    - 5
    - 6

ШТУРМ АБСОЛЮТНОГО НУЛЯ

О сколько нам открытий чудных
Готовят просвещенья дух
И опыт, сын ошибок трудных,
И гений, парадоксов друг…
А. С. Пушкин

Ранняя весна 1987 года несомненно войдет в грядущую летопись мировой науки как одна из наиболее ярких дат.

Представление о накале событий тех дней дает репортаж, опубликованный в одной из нью — йоркских газет в марте месяце того года:

«…Физики трех континентов предприняли атаку на один из нью — йоркских отелей, чтобы стать участниками созванной на скорую руку конференции…

Двери конференц — зала открыли в среду ранним вечером перед ревущей, блистающей всеми красками толпой, внезапно потерявшей свое профессорское достоинство. В течение трех минут она заполнила все 1200 мест для сидения, после чего еще около 1000 физиков набились в проходы между рядами и заняли места у простенков зала. Сотни других сражались у дверей за право войти.

Заседание продолжалось до трех часов ночи. Доклады транслировались по телемониторам, расположенным по гостиничным коридорам, около которых сгруппировались не попавшие на заседание ученые… Даже после официального закрытия обсуждение продолжалось до шести часов утра…

Это феномен, ничего подобного в истории физики еще не было, — сказал Теодор Гебалл из Стенфордского университета…»

В те мартовские дни ученые осаждали и конфе — ренц — зал Института физических проблем имени С. И. Вавилова Академии наук СССР.

На научных форумах и в Москве и в Нью — Йорке обсуждалось одно и то же событие — открытие высокотемпературной сверхпроводимости.

Трудно назвать другое открытие в мировой науке со столь сложной, причудливой и вместе с тем увлекательной судьбой.

История первооткрытия сверхпроводимости тесно связана с развитием физики низких температур.

Известно, что на верхний предел температур природа никаких ограничений не наложила. На Земле, в зоне термоядерных реакций, достигнуты температуры в сотни

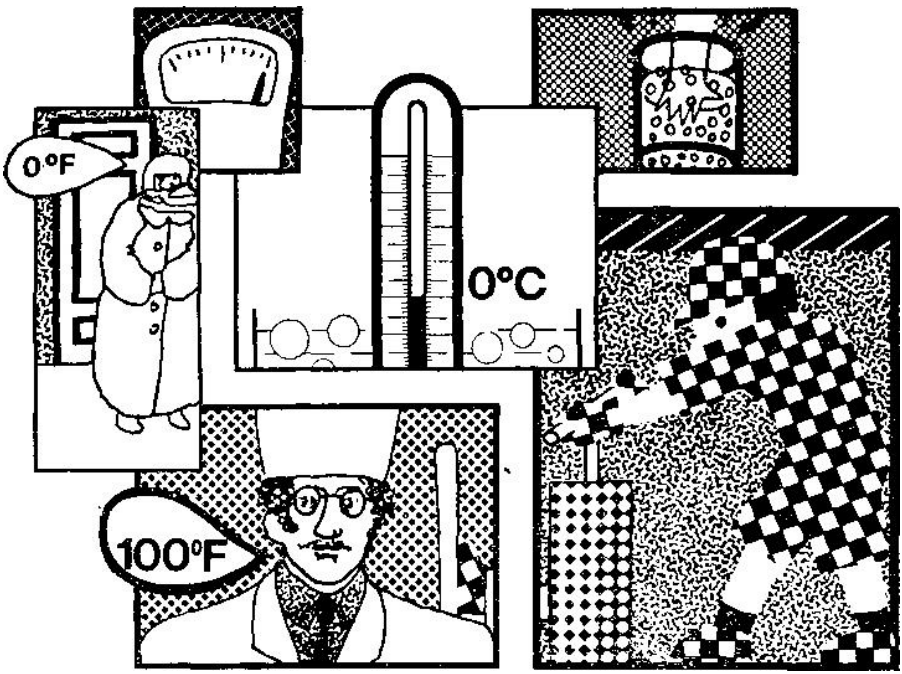
миллионов градусов, а в недрах звезд температуры составляют миллиарды и триллионы градусов.

Однако нижний предел температур строго ограничен законами физики. Это абсолютный нуль по шкале Кельвина или минус 273 градуса по Цельсию. Перейти этот рубеж не дано ни на Земле, ни в космосе, но и приблизиться к нему было совсем не легко.

Чтобы проникнуть в манящую своей загадочностью и недоступностью область температур вблизи абсолютного нуля, открыть удивительное физическое явление — сверхпроводимость, ученым пришлось преодолеть многочисленные препятствия.

Рассказом об этом своеобразном штурме абсолютного нуля и начинается эта книга.

1. Почему «обидели» температуру? Ошибка Фаренгейта. Порядок и беспорядок. Когда путь вниз труднее подъема. Ледяной кипяток. Существуют ли на Земле «холодные жидкости»?



Длину мы измеряем в метрах, массу — в граммах, время в секундах, а температуру в градусах.

Расстояние между городами исчисляется в десятках и сотнях километров, высота здания в метрах, а межатомные расстояния в стомиллионных долях сантиметра. Но во всех случаях эти величины положительные.

Выпуск продукции промышленных предприятий планируется в тоннах, в повседневной жизни мы имеем дело с килограммами и граммами. А для того чтобы выразить в граммах массу мельчайшей материальной частицы электрона, мы после запятой, перед первой значащей цифрой, должны написать 26 нулей. И все же это величина положительная.

И если вы прочтете в задачнике, что «расстояние между пунктом А и пунктом Б равно минус 5 метров», то сразу догадаетесь, что знак «минус» здесь опечатка.

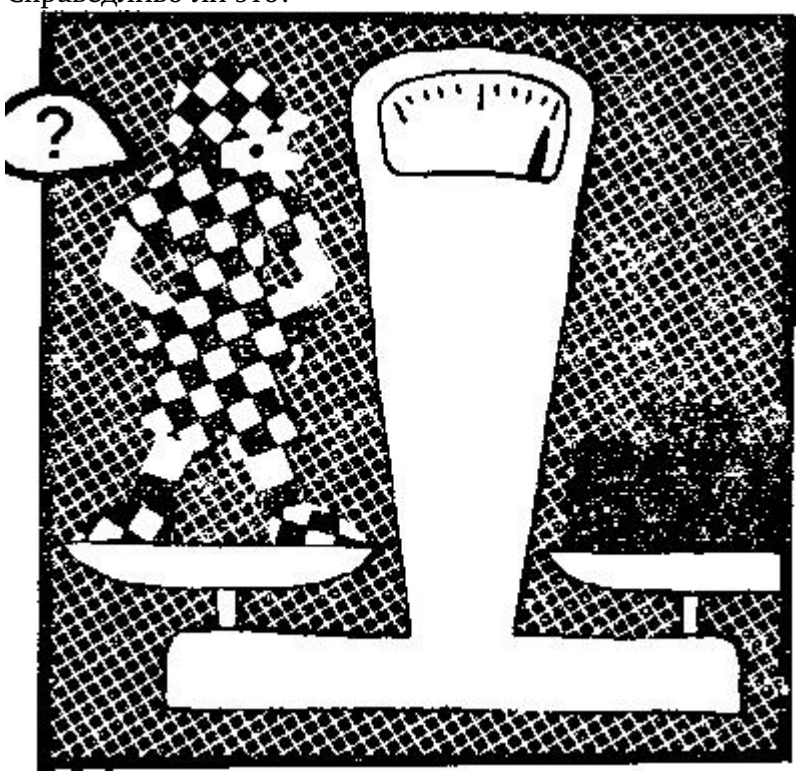
Такой же бессмысленностью в обыденной жизни представляются «отрицательный вес» и «отрицательное время». Но если вы скажете, к примеру, что температура воздуха равна минус 10 градусов, то этим вы никого не удивите.

В чем же здесь дело?

Если мы говорим, например, положительный человек, то это самый большой комплимент. Наоборот, отрицательные явления надо изживать.

Почему же так «обидели» температуру? Мы ей приписываем как положительные, так и отрицательные значения, в то время как другим физическим величинам только положительные.

Справедливо ли это?



Когда мы измеряем длину с помощью линейки или рулетки, взвешиваем предмет или запускаем стрелку секундомера, то при отсчете на шкале прибора или приспособления мы исходим из отметки «нуль», соответствующей наименьшему возможному значению величины. Поэтому во всех трех случаях значения измеряемых величин не могут быть меньше нуля.

Когда же впервые разрабатывались температурные шкалы, никто даже приблизительно не знал, какая может быть наименьшая температура, то есть с какой точки нужно начинать отсчет.

В 1714 году немецкий физик — самоучка Габриель Фаренгейт

за «нуль», то есть за низшую точку температурной шкалы, принял температуру смеси снега и нашатыря. За вторую опорную точку Фаренгейт принял, как он утверждал, нормальную температуру человеческого тела. Интервал между этими двумя точками он разбил на 100 равных делений. Каждое такое деление получило название «градус Фаренгейта», обозначаемый так: ˚Р (по первой букве фамилии ученого Fahrenheit).

По шкале Фаренгейта точка таяния льда $+32^0$F, а точка кипения воды —212˚F. Эта шкала до сих пор употребляется в Англии и США.

В 1742 году шведский астроном и физик Андерс Цельсий предложил шкалу термометра, в которой интервал между точкой таяния льда и точкой кипения воды был разбит на 100 равных частей, каждая из которых получила название «градус Цельсия», обозначаемый так: ˚С (по первой букве фамилии ученого Celsius). Точка таяния льда была принята за 0 ˚С, а точка кипения воды за 100 ˚С.

Эта шкала находит широкое применение в СССР и многих других странах.

Как перейти от температуры в градусах по шкале Фаренгейта к температуре в градусах по шкале Цельсия?

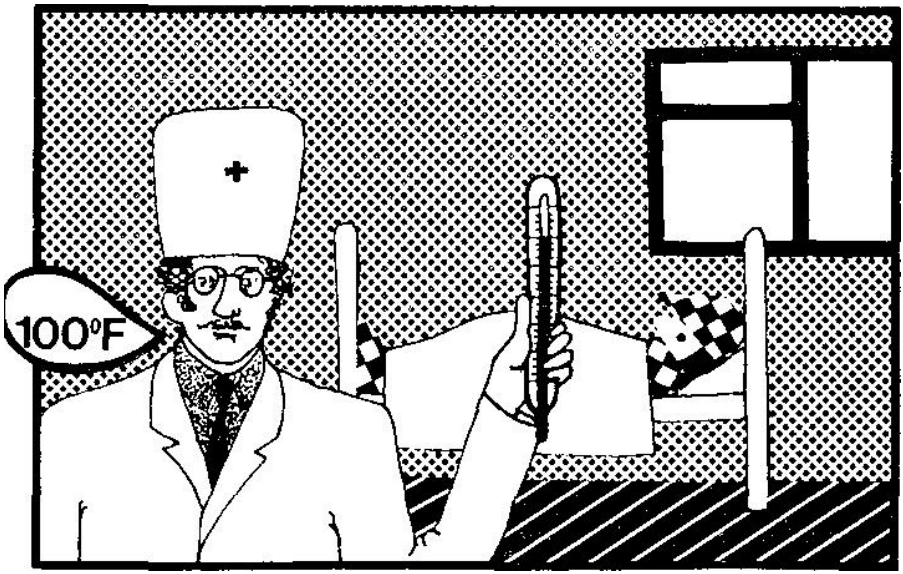
Расстояние между точкой таяния льда и точкой кипения воды на шкале Фаренгейта составляет 212—32 = 180 градусов, а на шкале Цельсия только 100 градусов. Следовательно, один градус Фаренгейта равнозначен 5/9 градусам Цельсия. Кроме того, точка таяния льда на шкале Фаренгейта сдви — нута вверх на 32 градуса по сравнению со шкалой Цельсия.

Отсюда легко можно вывести формулу перевода градусов Фаренгейта в градусы Цельсия: t˚C = 5/9 (n˚F — 32), где введены следующие обозначения: t˚C — температура в градусах по шкале Цельсия; n˚Р — температура в градусах по шкале Фаренгейта.

А теперь мы предлагаем читателю определить, какую ошибку допустил Фаренгейт при разработке своей шкалы. Напомним, что Фаренгейт принял за нормальную температуру человеческого тела 100˚F.

Подставив эту величину в приведенную выше формулу, мы обнаружим, что она соответствует 37,8 ˚С.

Но ведь с такой температурой врач немедленно отправит вас в постель!



В действительности нормальная температура человеческого тела не 100°F, а примерно 98°F.

Наличие двух разных температурных шкал создает определенные неудобства, особенно в наш век, когда контакты между людьми разных стран и континентов становятся все более тесными.

Однажды в гостинице одного из городов Европы остановился американский промышленник. Назовем его мистер Смит.

По приезде мистер Смит (он был человек предусмотрительный) вынул из чемодана взятый из дому привычный для него термометр Фаренгейта.

Однако в спешке (прибыло еще много других гостей) горничная перепутала и установила термометр Фаренгейта за окном соседнего номера, где остановился турист из Парижа — месье Поль, а в номере американца остался числящийся по описи гостиницы термометр Цельсия.

Вот что из этого вышло.

Представьте себе утро погожего дня ранней весны. Хотя столбик термометра еще стоит на нуле по Цельсию, под солнечными лучами уже начинает подтаивать. На выходе из гостиницы остановились двое.

Один из них — обливающийся потом американец, облаченный в тяжелую шубу. Он закутал свое лицо так, что виднеется только кончик носа. Рядом подпрыгивает, стуча от холода зубами, француз. Он оделся так, будто в знойный день собрался на пляж.

Этому предшествовали следующие события.

Проснувшись, мистер Смит первым делом взглянул на

термометр (он был уверен, что это термометр Фаренгейта, а на самом деле это был, как мы уже знаем, термометр Цельсия).

«Брр, какой ужасный мороз», — подумал американец: столбик термометра стоял на отметке 0° (используя приведенную выше формулу, легко подсчитать, что 0° по Фаренгейту соответствует минус 18° по Цельсию).

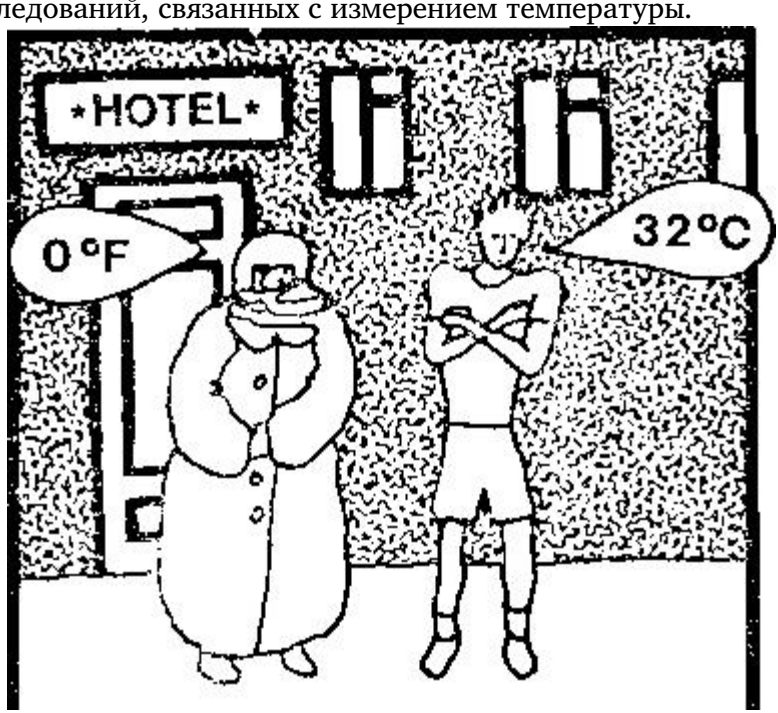
Естественно, мистер Смит экипировался соответствующим образом.

В то же самое время месье Поль, который не подозревал, что за окном его номера установлен термометр Фаренгейта, воскликнул:

— Какая тропическая жара, черт побери!

Термометр показывал плюс 32 градуса.

Разумеется, подобные казусы в обыденной жизни бывают не так уж часто. Однако отсутствие объективной температурной шкалы создавало немалые трудности при проведении исследований, связанных с измерением температуры.



Французский химик и физик Жозеф Гей — Люссак в 1802 году обнаружил интересную зависимость. Оказалось, что объем данной массы газа при постоянном давлении изменяется прямо пропорционально изменению температуры. При этом каждый раз при изменении температуры газа на 1 °С объем газа изменяется на одну и ту же величину независимо от природы газа, а именно на 1/273 его объема при 0 °С.

Так в физику вошел закон Гей — Люссака.

Этот закон позволил сделать интересные выводы.

Представьте себе следующий воображаемый опыт. Вы имеете некоторый объем газа, находящегося под постоянным давлением, и охлаждаете его начиная от 0 °С.

При охлаждении ка 1 °С объем газа уменьшается на 1/273 часть его первоначального объема. Вы охлаждаете газ еще на 1 °С, и уменьшение его объема составляет уже 2/273 части первоначального объема, и т. п. Наконец, при охлаждении на 273 °С… Но стоп! Мы слишком увлеклись. Ведь при охлаждении на 273 °С объем газа вообще должен был исчезнуть.

Значит, — 273 °С является наименьшей температурой, к которой можно подойти сколь угодно близко, но никогда нельзя достичь. Следовательно, естественно выбрать за исходную точку температуры, то есть за абсолютный нуль температуры, именно —273 °С.

Так возникла идея шкалы абсолютной температуры.

Но следует заметить, что при достаточно низкой температуре газ начинает сжижаться и закон Гей-Люссака не применим. В этом смысле наш воображаемый опыт не вполне корректен.

Более строгое доказательство того, что ни одно тело не может быть охлаждено ниже абсолютного нуля, основанное на втором законе термодинамики, принадлежит английскому физику Уильяму Томсону (лорду Кельвину), который в 1848 году ввел в науку понятие об абсолютной температуре и абсолютную шкалу температур.

Поэтому шкалу абсолютной температуры принято называть шкалой Кельвина или термодинамической температурной шкалой, а температуру, определяемую по этой шкале, — термодинамической.

Последующие измерения позволили так лее уточнить значение абсолютного нуля температуры. Оно оказалось равным —273,15 °С.

В Международной системе единиц измерения физических величин, принятой международным форумом — XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 году, одной из шести основных единиц является единица термодинамической температуры — кельвин, обозначаемая буквой К (устаревшее название «градус Кельвина» или °К). Один кельвин равен одному градусу Цельсия.

Для того чтобы градусы Цельсия перевести в кельвины, достаточно к числу градусов Цельсия добавить 273,15. Следовательно, температура таяния льда составляет 273,15 К, а точка кипения воды 373,15 К.

Удобство термодинамической температурной шкалы

заключается в первую очередь в отсутствии отрицательных температур. Эта шкала широко используется при научных исследованиях и в технике.

В повседневной жизни мы пока пользуемся шкалой Цельсия, так как к большим числам, в которых выражается температура в кельвинах, сразу привыкнуть трудно.

Вполне очевидно, недалеко время, когда шкала Кельвина станет единой, как это предусмотрено международными соглашениями.

Понятие абсолютной температуры было введено в науку в середине прошлого века. Однако прошло свыше ста лет, прежде чем шкала Кельвина получила официальное признание.

Почему так получилось?

В температурной шкале Цельсия нуль вполне ощутимая точка. Тело, охлажденное до такой температуры, вы можете потрогать рукой.

Абсолютный нуль температуры выведен на основании теоретических умозаключений, подобно тому как случается, что астроном «вычисляет» далекую планету еще до того, как ее удается обнаружить с помощью оптических приборов.

Чтобы приблизиться к абсолютному нулю, нужно было получить температуру гораздо ниже, чем в самой холодной точке нашей планеты.

Более двухсот семидесяти градусов отделяет область абсолютного нуля температуры от нуля градусов Цельсия.

Много это или мало?

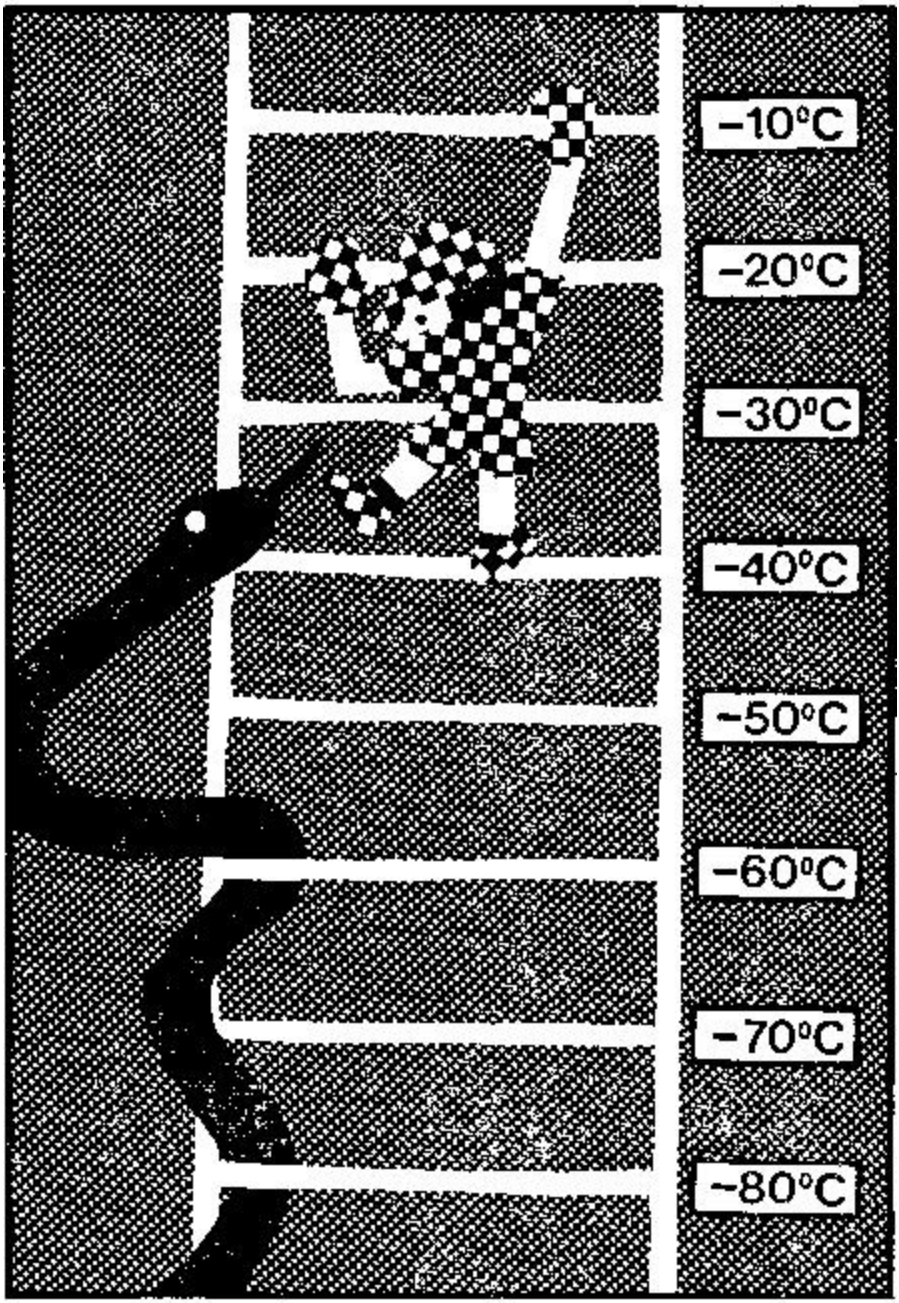
Повышать температуру на сотни и даже тысячи градусов человек научился еще во времена глубокой древности, пожалуй начиная с того момента, когда он впервые добыл огонь.

Техникой получения низких температур человек овладел в результате долгого пути исторического развития. Спуститься «вниз» по температурной шкале оказалось значительно труднее, чем подняться «вверх».

…Если у вас в комнате все вещи находятся в определенном порядке, то легко можно найти нужный предмет.

Однако если вы, вернувшись из школы, бросите портфель куда попало, а переодевшись, не уложите аккуратно вашу одежду в шкафу, разбросаете в беспорядке по комнате, то вам придется затратить немало времени для поиска нужной вещи.

Устроить беспорядок проще всего. Гораздо труднее восстановить порядок.



Существует общий закон природы, согласно которому термодинамические процессы самопроизвольно идут в направлении от более упорядоченного состояния к менее упорядоченному.

Можно привести немало примеров в подтверждение этого закона.

Если бросить в стакан с водой кусок сахара, то сахар через некоторое время растворится в воде, его молекулы распределятся по всему объему стакана равномерно. Вы можете ждать практически сколь угодно долго, но раствор сам по себе не разделится на сахар и воду.

При повышении температуры кристаллы превращаются в жидкость, а затем в газ.

В твердом теле каждый атом (или молекула) занимает определенное положение в пространстве. Он может совершать колебания около положения равновесия, но далеко уйти от отведенного ему места атом, как правило, не в состоянии. В этом смысле в твердом теле существует почти идеальный порядок.

В жидкости молекулы (или атомы) «упакованы» почти так же плотно, как в твердом теле. Однако в отличие от твердого тела они не находятся здесь «на привязи»: они сравнительно легко меняют свое положение. Следовательно, в жидкости гораздо меньше порядка, чем в твердом теле.

В газах расстояние между молекулами (атомами) в среднем во много раз больше размера самих молекул. Атомы и молекулы перемещаются в пространстве с огромными скоростями. Сталкиваясь, они отскакивают друг от друга, словно бильярдные шары. Чем сильнее нагревается газ, тем беспорядочнее становится движение его молекул.

Итак, при нагревании вещества его атомы или молекулы переходят из более упорядоченного в менее упорядоченное состояние, что не противоречит естественному ходу событий. Получить высокие температуры (до десятков и сотен тысяч градусов) сравнительно легко.

Наоборот, искусственно охлаждая вещество, мы стремимся перейти от беспорядка к порядку. А природных резервуаров глубокого холода на Земле нет.

Для получения холода люди еще во времена глубокой древности использовали испарение. Так, в Древнем Египте напитки хранились в пористых сосудах. Поры увеличивали поверхность испаряющейся жидкости, а плохая теплопроводность материала сосуда уменьшала подвод тепла извне. Все это способствовало охлаждению жидкости.

При нормальных условиях жидкость испаряется медленно. Так, если вы оставите в блюдечке немного воды, то пройдет несколько суток, прежде чем она полностью испарится.

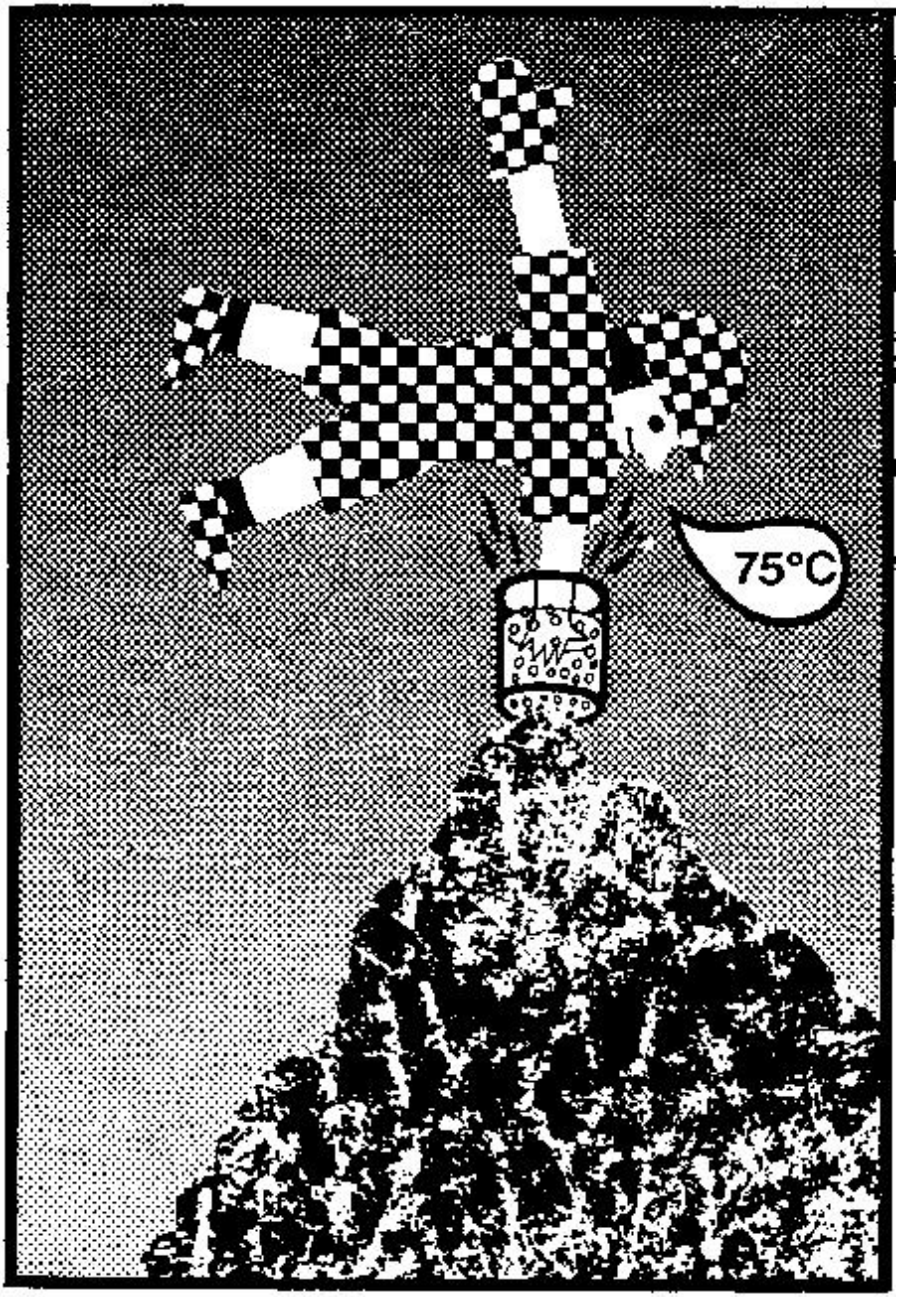
Для того чтобы охладить вещество, необходимо ускорить процесс испарения. Природа сама подсказывает нам такую

возможность.

Представьте себе, что в жаркий летний день вы выходите на берег из воды и вас обдувает порыв ветра. Вы сразу чувствуете холод. Объясняется это тем, что ветер сдувает пары жидкости, испаряющейся с вашего мокрого тела, а поэтому скорость испарения увеличивается.

Интенсивность испарения увеличивается и по мере повышения температуры жидкости. Наконец, при определенной температуре жидкость начинает кипеть.

…Если я вам предложу охладить температуру вашего тела, обдав его …кипятком, вы, наверное, с ужасом откажетесь от такого эксперимента. Между тем, оказывается, существует и холодный… кипяток.



Когда мы говорим, что вода кипит при температуре 100 °С, то подразумеваем, что этот процесс происходит при нормальном атмосферном давлении (760 миллиметров ртутного столба). С понижением атмосферного давления точка кипения воды смещается вниз по температурной шкале.

При подъеме в горы атмосферное давление снижается.

На Памире есть пик Ленина, расположенный на высоте 7134

метра над уровнем моря, где давление составляет примерно 300 миллиметров ртутного столба.

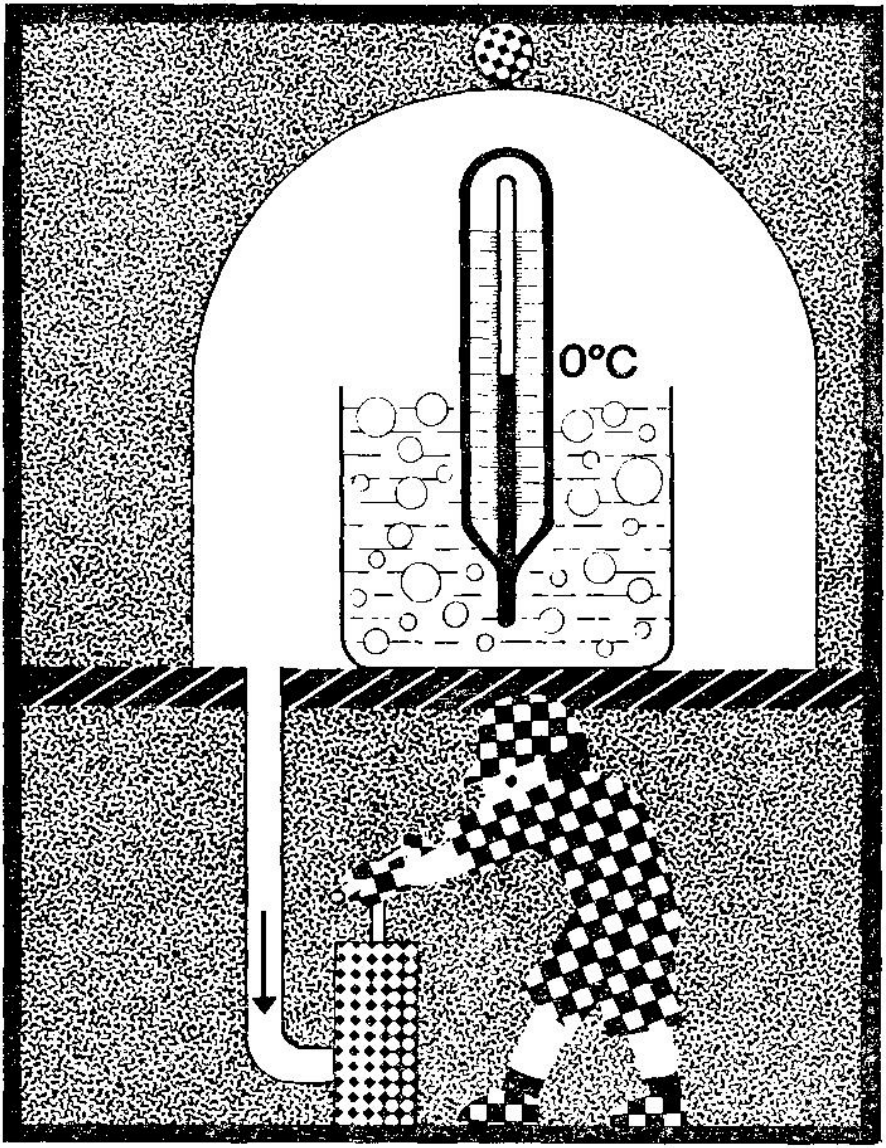
Здесь температура кипения воды приблизительно равна 75 ˚С. В таком кипятке сварить, например, мясо невозможно.

Впрочем, для того чтобы понизить температуру кипения воды, вовсе нет необходимости штурмовать заоблачные высоты. Достаточно поставить сосуд с водой под колпак воздушного насоса.

Откачивая пары, вы можете заставить кипеть воду при температуре значительно ниже 100 ˚С. Так, при давлении в 20 миллиметров ртутного столба вода закипает при комнатной температуре, а при снижении давления до 4,6 миллиметра ртутного столба можно получить «кипяток», имеющий температуру замерзания воды! Между температурой кипения воды и давлением паров жидкости не существует линейной зависимости. Так, для того чтобы понизить температуру кипения со 100 ˚С до 80 ˚С, нужно снизить давление примерно в два раза. А для дальнейшего понижения точки кипения еще на 20 ˚С давление нужно снизить уже почти в два с половиной раза по сравнению с предыдущим… Наконец, для понижения температуры кипения до 0 ˚С давление нужно уменьшить почти в четыре раза по сравнению с его величиной при 20 ˚С.

Между тем по мере уменьшения давления откачивать пары становится все труднее. Охлаждаясь, жидкость в конце концов затвердевает.

Разумеется, вода, замерзающая около 0 ˚С, непригодна для получения более низких температур.



Ледяной кипяток. Откачивая пары из-под колпака, вы можете получить кипяток, имеющий температуру замерзания воды.

Мало пригодны для этой цели и другие вещества, существующие в жидком виде при комнатной температуре.

Для получения низких температур нужны более «холодные жидкости».

Еще два столетия назад известный французский ученый Антуан Лавуазье писал:

«…Если бы мы смогли поместить Землю в некую весьма холодную область, например в атмосферу Юпитера или Сатурна,

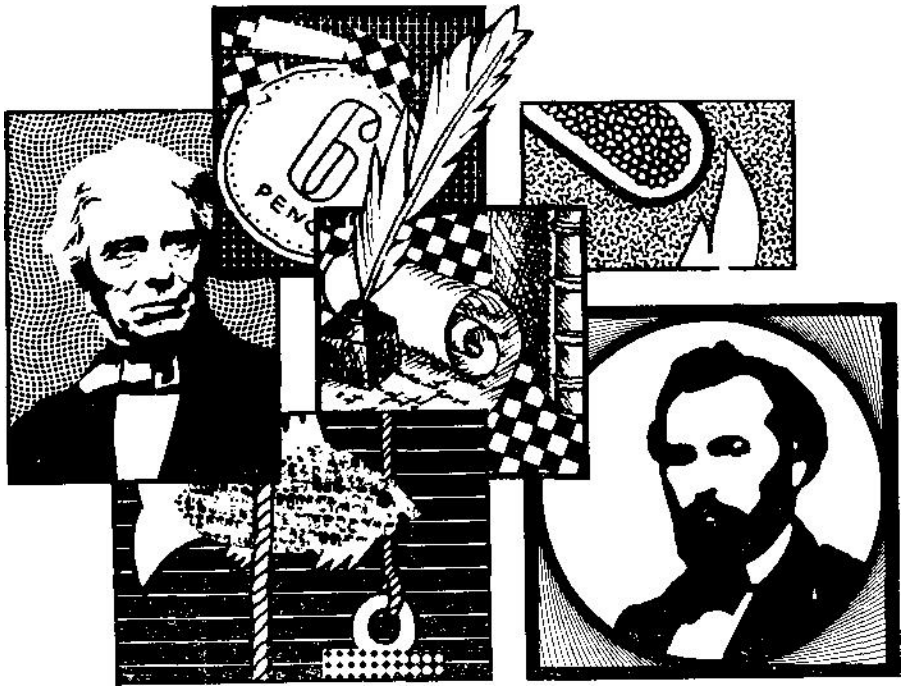
то все наши реки превратились бы в горы. Воздух (или, по крайней мере, некоторые его компоненты) перестал бы быть невидимым и превратился бы в жидкость. Превращение такого рода открыло бы возможность получения новых жидкостей, о которых мы до сих пор не имели никакого понятия».

Наиболее низкая температура воздуха, зарегистрированная в самых холодных областях земного шара, составляет —90 °С. Однако и при такой температуре не наблюдается сжижение воздуха или его компонентов.

Как практически осуществить сжижение атмосферных газов? Не посылать же на самом деле с этой целью экспедицию на Юпитер, Сатурн или в другой пункт Галактики!

Чтобы проникнуть в неведомую ранее область низких температур, надо было прежде всего решить проблему сжижения атмосферных газов в земных условиях.

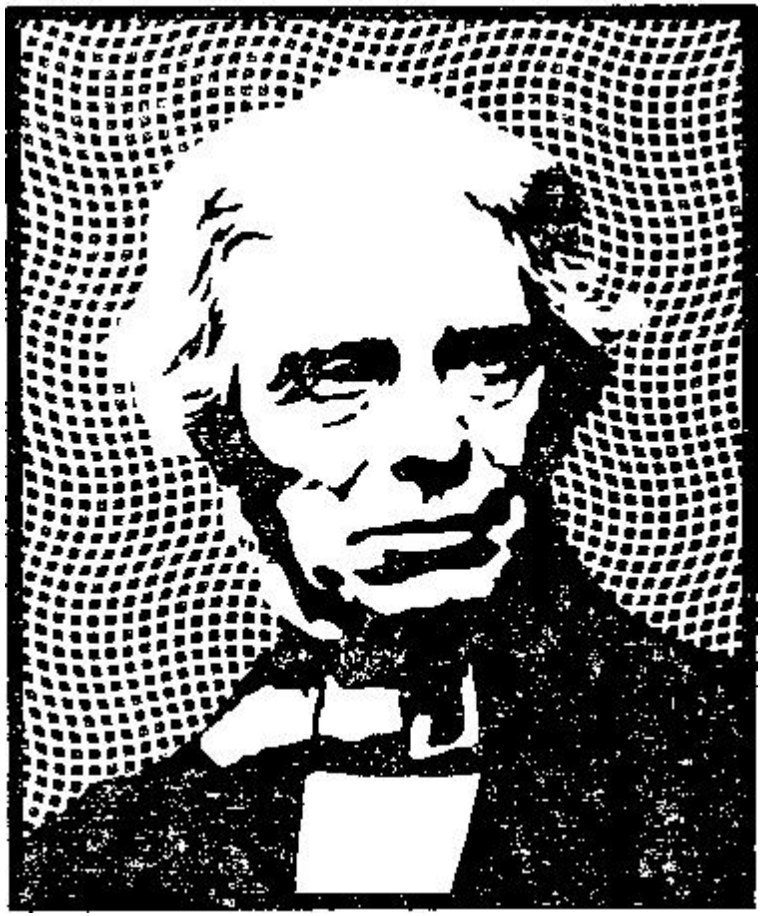
2. Читатель узнает, что и пенсы могут служить науке. Что скрывалось за «грязью» в сосуде. Две тысячи метров под водой. Последствие одной аварии. Привидение, которое не возвращается.



Одним из первых вступил на долгий и тернистый путь, ведущий к абсолютному нулю температуры, Майкл Фарадей.

Это имя известно школьникам из учебника физики.

Фарадей — автор выдающихся открытий в области электричества и магнетизма — является одним из основоположников современной электротехники.



…Майкл Фарадей родился 22 сентября 1791 года в семье кузнеца одного из лондонских предместий. Его отец, несмотря на большое трудолюбие и отменное мастерство, зарабатывал мало, и семья жила в нужде.

Поэтому Майкл не имел возможности окончить даже начальную школу. В возрасте тринадцати лет он поступил учеником переплетчика в большую книжную лавку. В те времена срок ученичества, даже для овладения такой несложной профессией, как переплетчик, был установлен в… семь лет.

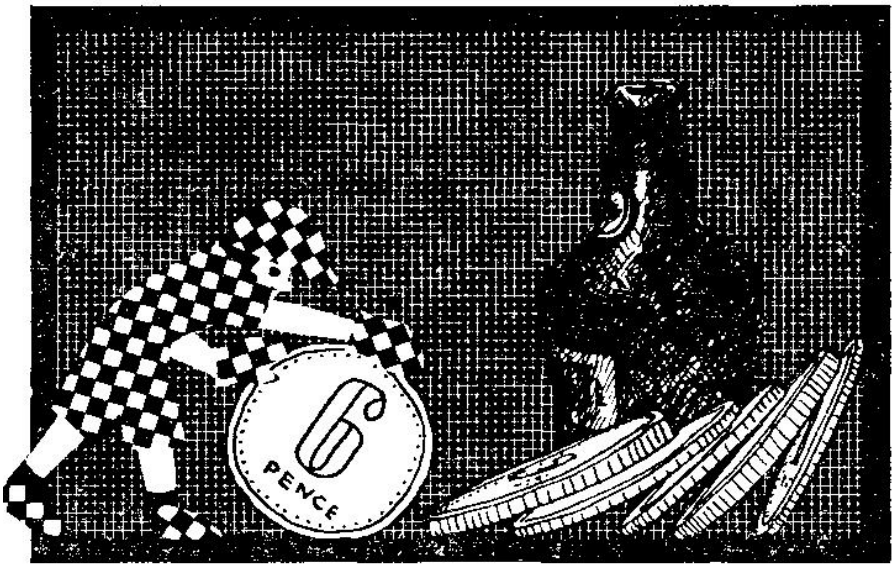
Ученик должен был подметать помещение, мыть полы, разносить заказы, нянчить хозяйских детей.

Приученный с ранних лет в семье к трудолюбию, Майкл усердно выполнял свои многочисленные обязанности. А свободное время он посвящал чтению.

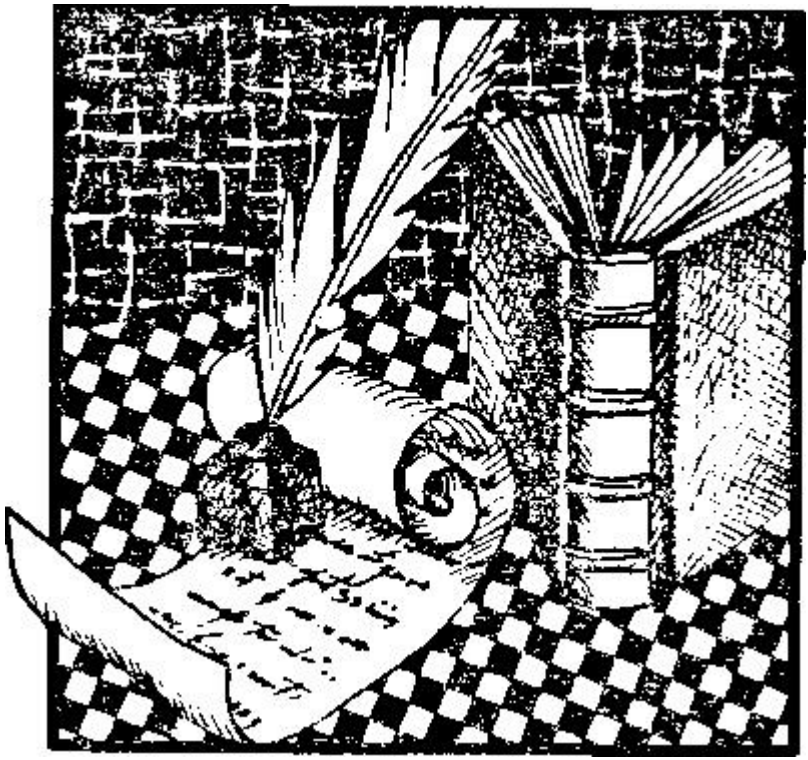
Сначала Фарадей читает все, что попадается под руку. Затем у него появляется интерес к естественным наукам. Он изучает статьи по электричеству в Британской энциклопедии и популярную книгу «Успехи химии».

Пробует и сам проводить описанные в литературе опыты, проявляя при этом незаурядную находчивость.

Стеклянная бутылка служит ему для изготовления электростатической машины, а гальваническую батарею он собирает из цинковых кружков и медных пенсов.



Книжную лавку часто посещали ученые. Один из них, некто Дэне, обратил внимание на любознательного юношу и принес Фарадею билеты на публичные лекции известного химика Гемфри Дэви, которые тот читал в Королевском институте — научном центре английской столицы.



По совету того же Дэнса Фарадей тщательно обработал свои конспекты лекций, переплел их и послал Дэви вместе с письмом, содержащим просьбу о приеме на работу в качестве помощника.

Неизвестно, что больше произвело впечатление на Дэви — сам конспект его лекций или сделанный с высоким профессиональным мастерством переплет. Говорят, он обратился за советом к своему приятелю: как быть? И тот будто бы сказал:

«Предложите парню мыть посуду. Если он на что-нибудь годен, то сейчас же примется за дело. Если откажется, значит, никуда не годится».

Сейчас трудно установить, все ли так обстояло в действительности. Но в 1813 году Фарадей получил место ассистента Дэви в химической лаборатории Королевского института.

Фарадей должен был содержать в чистоте лабораторное оборудование, подготавливать аппаратуру и помогать Дэви в проведении экспериментов и демонстрации опытов на лекциях. Но он внимательно присматривался к работам своего наставника и других сотрудников института, стараясь перенять их опыт.

В это время Дэви пригласили посетить ряд научных центров европейского континента. Он берет в поездку своего ассистента. Фарадей получил возможность ознакомиться с работами видных иностранных ученых.

По возвращении из-за границы Фарадей приступает к самостоятельным исследованиям.

Он проводит ряд оригинальных химических опытов, а в 1821 году делает важное открытие в области электричества — создает лабораторную модель электрического двигателя.

Однажды, это было в 1823 году, Фарадей, изучая химическое разложение одного из соединений хлора — гидрата хлора, нагревал последний в герметически запаянной стеклянной трубке.

Он наблюдал, как по мере нагревания одного конца изогнутой трубки на другом ее, холодном, конце собирались капли маслянистой жидкости.

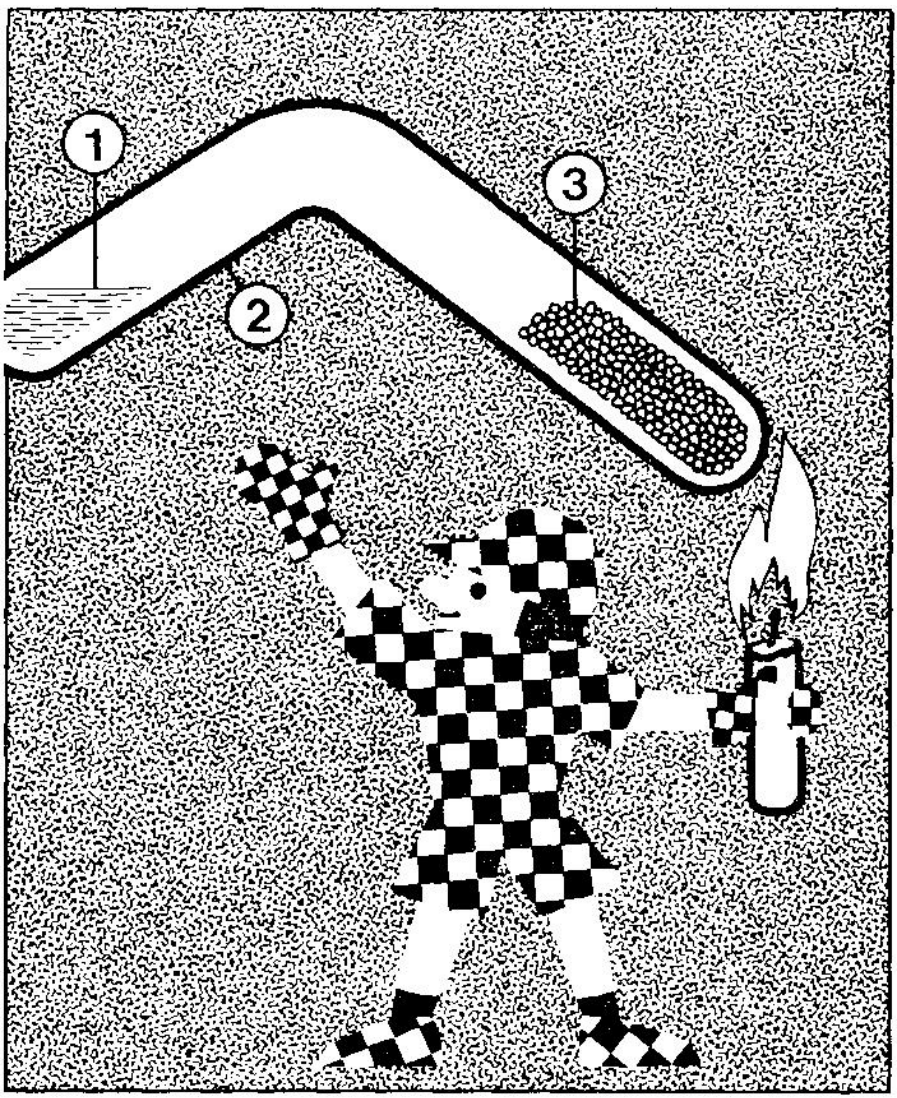


Схема опыта Фарадея: 1 — жидкость; 2 — «холодный» конец трубки; 3— соединение хлора. Экспериментатор наблюдал, как в холодном конце трубки скапливалась жидкость.

В этот момент в лабораторию зашел сотрудник института доктор Пэрис. Он также заметил «масло» в пробирке и решил, что Фарадей проводит эксперимент в грязной посуде.

Однако Фарадей никак не реагировал на упрек доктора, и тот, пожав плечами, удалился.

А на следующий день Пэрис получил записку какого содержания: «Милостивый государь! Масло, замеченное Вами вчера, было ничем иным, как жидким хлором. Преданный Вам М. Фарадей».

Что же произошло в лаборатории после ухода Пэриса?

Желая исследовать маслянистое вещество, Фарадей отрезал часть пробирки, в которой оно находилось. Мгновенно раздался взрыв, и жидкость исчезла. Загадочное вещество представляло собой жидкий хлор.

Действительно, по мере нагревания гидрата хлора в герметически запаянной пробирке из него выделялся газообразный хлор. Не имея выхода наружу, газ все более и более сжимался. А о том, что при достаточном сжатии газы могут перейти в жидкое состояние, было известно уже во времена Фарадея.

Так исследователь получил первую холодную жидкость — жидкий хлор, имеющий температуру кипения при нормальном давлении — 34,1 ˚С.

Но почему жидкость образовывалась именно в холодном конце трубки? И у Фарадея мелькает мысль о том, что в процессе сжижения газа, кроме давления, определенную роль играет и температура.

В дальнейшем Фарадей видоизменил опыт, погрузив «холодный» конец трубки в охлаждающую смесь.

Эта уловка увенчалась успехом.

Кроме хлора, так им были сжижены аммиак, закись азота, углекислый газ, двуокись серы.

Уже первая серия работ Фарадея в области химии и электричества получила высокую оценку современников. Его избирают членом Лондонского королевского общества.

Так сын деревенского кузнеца стал академиком.

Дальнейшая научная деятельность Фарадея была почти полностью посвящена электричеству. Проложив как бы мост между электричеством и магнетизмом, он открывает в 1831 году явление электромагнитной индукции, а еще через два года

формулирует свои знаменитые законы электролиза. Затем следует разработка учения об электрическом и магнитных полях, открытие явлений парамагнетизма и диамагнетизма.

В 1845 году Фарадей провел опыты по сжижению газов с помощью двух насосов. Первый насос сжимал газ до давления в 10 атмосфер[1]. Затем газ поступал во второй насос, где сжимался до давления в 50 атмосфер. Стеклянная трубка, в которой накапливался сжатый газ, проходила под колокол воздушного насоса, а ее запаянный конец погружался в охлаждающую смесь эфира с твердой углекислотой.

Но новых успехов в сжижении газов Фарадей добиться не смог.

Одновременно с Фарадеем над проблемой сжижения атмосферных газов работали ученые разных стран.

В то время считали, что газ можно сжижать либо путем глубокого охлаждения, либо сжимая достаточно высоким давлением. Получить низкие температуры было трудно. Поэтому второй путь казался предпочтительным.

Однако не помогало самое высокое давление, которое можно было получить в лабораторных условиях. И тогда исследователи старались реализовать еще большие давления. Так, например, один из них сжимал кислород и азот почти до двухсот атмосфер, поместив эти газы в специальные цилиндры и погрузив их на глубину около двух километров в океане.

Но ни кислород, ни азот, ни водород не проявляли никаких признаков сжижения, какому бы сжатию их ни подвергали.

Многие ученые стали привыкать к мысли, что это так называемые «постоянные газы», то есть газы, не превращающиеся в жидкость ни при каких условиях.

Фарадей не разделял подобных взглядов.

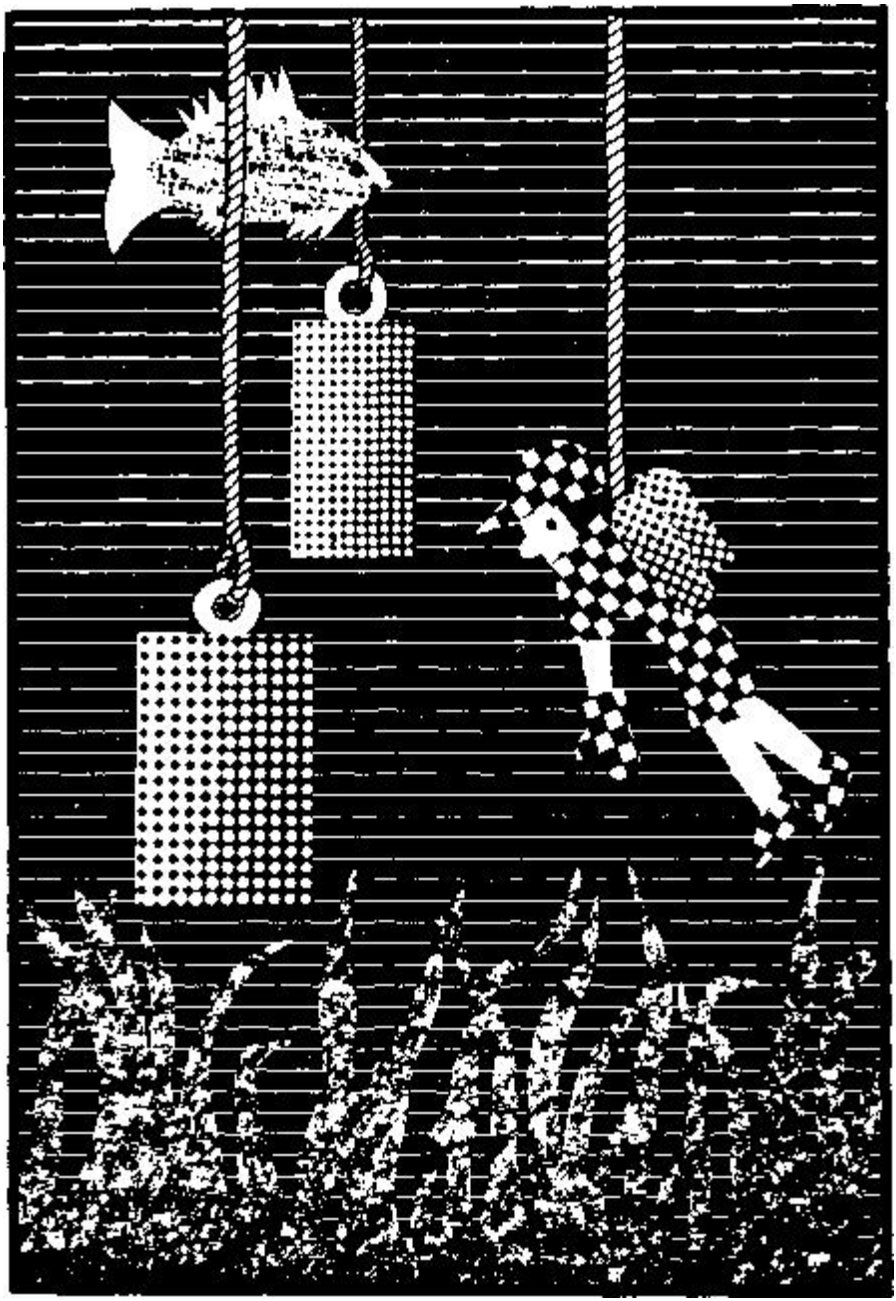
В своих записках он отмечал, что достигнутое охлаждение, очевидно, недостаточно для сжижения таких газов, как кислород, азот или водород, даже при сколь угодно большом давлении. Ученый выражал уверенность в том, что при более глубоком охлаждении задача сжижения атмосферных газов под давлением будет решена.

Но подорванное тяжелым детством здоровье Фарадея все ухудшалось. Начиная с 50–х годов он вынужден постепенно сокращать объем своих исследований, а затем и вовсе их прекратить.

25 августа 1867 года Фарадей скончался. А десять лет спустя французский инженер Кальете впервые осуществил сжижение кислорода.

Луи Поль Кальете родился в 1832 году в небольшом

французском городке Шатильон на Сене в семье промышленника. Вскоре по окончании Горного института он руководит чугуноплавильными заводами своего отца.



Стремясь усовершенствовать производство, молодой инженер изучает металлургические процессы.

Судя по всему, на этом поприще он добился немалых успехов.

В 1877 году его избирают членом — корреспон- дентом Парижской академии наук — честь, которой удостаивался далеко не каждый провинциальный инженер.

Кальете прославил свое имя не работами в области высоких температур, при которых протекают металлургические процессы. Он вошел в историю физики как один из первопроходцев к абсолютному нулю температуры.

Кальете, подобно многим своим предшественникам, начал эксперименты с попыток сжижения газа под высоким давлением. Первым газом для его опытов послужил ацетилен. Предварительный расчет показал, что для сжижения этого газа при комнатной температуре требуется давление около 60 атмосфер.

Однако перед достижением заданного давления аппаратура неожиданно дала течь, и сжимаемый газ начал просачиваться наружу.

Кальете, внимательно следивший за толстостенным стеклянным сосудом с ацетиленом, успел заметить, что немедленно после возникновения течи в сосуде образовалось легкое облачко, которое быстро исчезало.

Сначала Кальете решил, что обнаруженное им явление обусловлено наличием примесей в ацетилене, предположив, что видел капельки воды. Он повторил опыты, использовав

химически чистый ацетилен, и снова появилось облачко.

Теперь сомнений не оставалось. Исследователь наблюдал именно конденсацию ацетилена.

Не теряя времени, Кальете приступает к экспериментам по сжижению атмосферных газов. Он выбирает кислород, так как этот газ было нетрудно получить в чистом виде. Он сжимает кислород до давления примерно 300 атмосфер и затем подвергает толстостенный стеклянный сосуд с кислородом охлаждению до — 29 °С, окружив его испаряющейся двуокисью серы.

Когда Кальете приоткрыл клапан и выпустил из сосуда часть газа, давление его внезапно упало. Расширяясь, газ совершил работу. При этом тепло к газу не подводилось, и по закону сохранения энергии он охладился. Экспериментатор вновь заметил облачко конденсирующихся капель.

Так впервые удалось сжижить кислород.

Эксперименты Кальете подтвердили вывод Фарадея о том, что для сжижения газов существенное значение имеет не только давление, но и температура.

Действительно, детальное исследование роли давления и температуры в процессе сжижения газов, проведенное в 1870 году великим русским химиком Д. И. Менделеевым, показало, что для каждого газа существует предельная температура, выше которой газ не может быть сжижен ни при каком сколь угодно большом давлении. Менделеев назвал эту температуру «абсолютной температурой кипения».

Независимо от Менделеева подобное исследование провел английский физик Томас Эндрюс, который ввел в науку термин «критическая температура».

Представьте себе закрытый сосуд, в котором находится некоторое количество жидкости, например воды. В результате испарения над жидкостью образовывается насыщенный пар. При этом одно и то же вещество существует одновременно в двух состояниях, или, как говорят физики, в двух фазах — жидкой и газообразной.

При комнатной температуре плотность пара значительно меньше плотности соответствующей жидкости.

С повышением температуры плотность жидкости уменьшается, а плотность газа увеличивается.

Наконец наступает момент, когда плотность жидкости и пара совпадает.

Температура, при которой плотности жидкости и ее насыщенного пара совпадают, называется критической температурой данного вещества.

При температуре выше критической вещество может находиться только в одном состоянии — газообразном. При таких условиях газ невозможно сжижить даже при сколь угодно сильном сжатии.

Критические температуры разных веществ существенно отличаются друг от друга. Например, воды + 374 °С, кислорода —118 °С, водорода — 240 °С.

Однако вернемся к экспериментам Кальете.

Температура кипения кислорода при атмосферном давлении — 183 °С. Следовательно, французскому инженеру удалось преодолеть значительный отрезок пути к абсолютному нулю.

Может быть, кто-либо был склонен объяснить это достижение счастливой случайностью. Ведь мысль о возможном способе сжижения атмосферных газов пришла в голову Кальете в момент аварии его аппарата.

Конечно, и в науке бывают случайности. Но не они решают дело.

Каждый новый шаг в науке подготавливается предыдущими научными открытиями и достижениями в той или иной области.

Кальете в момент своего открытия был уже зрелым ученым.

Он детально изучил работы своих предшественников и ясно видел цель, к которой стремился. Иначе он не заметил бы мгновенно исчезнувшее облачко.

Не случайно многие важные открытия были сделаны разными учеными независимо друг от друга.

Так было и на этот раз.

Почти одновременно с Кальете сжижение кислорода произвел женевский физик Рауль Пикте, действуя другим методом.

Мы уже знаем, что газ, критическая температура которого выше комнатной, можно сжижить сжатием без предварительного охлаждения.

Полученная таким образом жидкость используется для охлаждения второго газа, критическая температура которого значительно ниже комнатной, но выше температуры кипения этой жидкости.

Жидкость, полученную после сжижения второго газа, можно использовать для сжижения третьего газа с еще более низкой критической температурой, и т. п.

Такой метод получил название каскадного.

Пикте сжижил кислород, использовав в первом каскаде двуокись серы, а во втором каскаде — двуокись углерода.

Сообщения об удачном завершении эксперимента Кальете и Пикте были оглашены на собрании Парижской академии наук 24 декабря 1877 года, а через неделю, в самый канун нового 1878

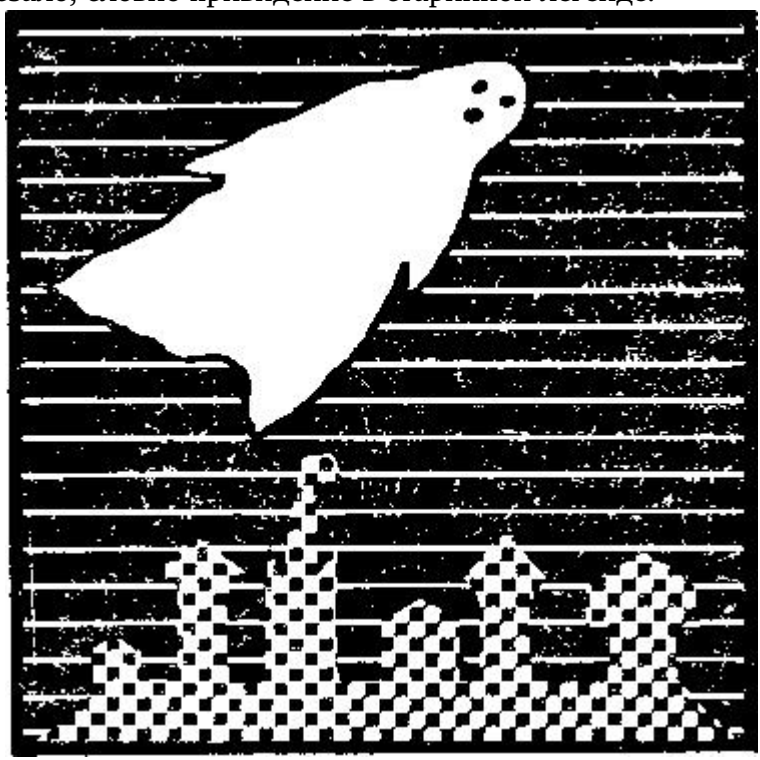
года, Кальете объявил о сжижении азота (температура кипения — 196 ˚С).

Некоторое время спустя Пикте, пополнив свою установку третьим каскадом, где он применил кислород, сжижил воздух. Воздух, как известно, состоит в основном из азота и кислорода и имеет температуру кипения промежуточную между температурами кипения этих составляющих, а именно — 194,4 ˚С.

В 1882 году Кальете вернулся к своему эксперименту, применив для охлаждения сосуда со сжатым кислородом этилен вместо двуокиси серы.

Температура первоначального охлаждения понизилась до — 105 ˚С.

Однако облачко сжиженного газа по — прежнему мгновенно исчезало, словно привидение в старинной легенде.



Удержать в сосуде жидкость, кипящую при немыслимо низкой температуре, — такую задачу предстояло решить исследователям.

Здесь успех сопутствовал двум польским физикам З. Вроблевскому и К. Ольшевскому.

3. «Призрак» превращается в реальность. Скрипка Дьюара. Сюрприз на финишной прямой. Последняя крепость взята! Окно в мир сверхпроводимости.

Зыгмунт Флоренты Вроблевский родился в 1845 году в городе Гродно. Окончив гимназию с серебряной медалью, он поступил в 1862 году на физико — математический факультет Киевского университета.

В 1863 году за участие в политической деятельности восемнадцатилетний студент подвергается аресту. Вроблевский проводит шестнадцать месяцев в тюремных застенках Гродно и Вильно, откуда его гонят по этапу в ссылку в город Томск.

Только в 1869 году, амнистированный по «высочайшему манифесту», Вроблевский смог вернуться домой.

Стремясь получить научное образование, опальный студент едет в Германию.

Нелегко пришлось на чужбине молодому человеку, обладающему весьма ограниченными материальными средствами. Приходилось довольствоваться мизерной денежной помощью, которую могли оказать родители, и случайными гонорарами за научно — популярные статьи в русской газете «Сын Отечества».

В сибирской ссылке Вроблевский усиленно изучал научно — популярную литературу по естественным наукам.

Стремясь творчески познать явления окружающего мира, он разработал новую космическую теорию.

Тщетно пытался Вроблевский заинтересовать своей космической теорией немецких физиков Кир- гофа и Клаузиуса. И тот и другой оказали ему весьма холодный прием.

По — иному встретил Вроблевского видный естествоиспытатель, профессор Берлинского университета Г ерман Гельмгольц.

Он внимательно выслушал посетителя и терпеливо разъяснил его ошибки.

— А если мои доводы вас не убедили, то почему ж вам не провести эксперименты в моей лаборатории? — спросил Гельмгольц, доброжелательно глядя на юношу, жаждавшего посвятить свою жизнь науке.

Вроблевский с радостью принял это предложение.

Вскоре он убедился в ошибочности своих космических взглядов и занялся проблемой, имеющей важное значение для развития физики, — исследованием свойств газов.

В 1874 году, после защиты докторской диссертации, Вроблевский получил должность ассистента, а затем доцента при кафедре физики Страсбургского университета.

Работы молодого ученого получили признание научного мира. Они заслужили высокую оценку одного из корифеев науки — английского физика Максвелла.

Польские физики с понятным интересом следили за научными успехами своего соотечественника.

Вроблевский получает приглашение перейти на работу в Краковский университет.

До возвращения на родину Вроблевский в течение одного года работал в лаборатории известного в то время химика, члена Парижской академии наук Сент — Клер Девиля, где он провел ряд экспериментов с аппаратом Кальете.

Наблюдая за голубоватым облачком сжиженного кислорода, внезапно появляющегося внутри толстостенного сосуда, чтобы сразу исчезнуть, словно мираж в пустыне, исследователь задумался над вопросом: как удержать необычайно холодную жидкость?

В 1882 году Вроблевский возглавил кафедру физики в Краковском университете. Он немедленно выписал из Парижа аппарат Кальете.

С не меньшим нетерпением ждал прибытия французского аппарата и другой краковский физик — Кароль Ольшевский. Он в течение многих лет безуспешно работал над усовершенствованием устаревшего оборудования для сжижения газов.

Ольшевский пришел в восторг, когда увидел в Кракове современную аппаратуру Вроблевско- го. Физики стали работать вместе.

Краковская установка для сжижения кислорода была собрана в феврале 1883 года. А уже в апреле того же года в трубке аппарата «спокойно» кипела голубоватая жидкость.

Вроблевский и Ольшевский усовершенствовали аппаратуру Кальете.

Стеклянная трубка была изогнута так, что собирающийся в ней жидкий кислород не мог уходить через расширяющуюся верхушку, а удерживался в нижней части трубки.

Далее, для охлаждения трубки использовался жидкий этилен, кипящий не при атмосферном давлении, как это было в экспериментах Кальете, а при давлении в 2,5 сантиметра ртутного столба, то есть в тридцать раз меньшем. Температура была понижена до — 130 ˚С.

После того как в трубку был введен кислород под высоким давлением, сквозь прозрачную стенку можно было увидеть капельки жидкости, которые, скатываясь, собирались на донышке. «Призрак» приобрел реальное очертание.

Кислород был сжижен без использованного Кальете первоначального расширения газа.

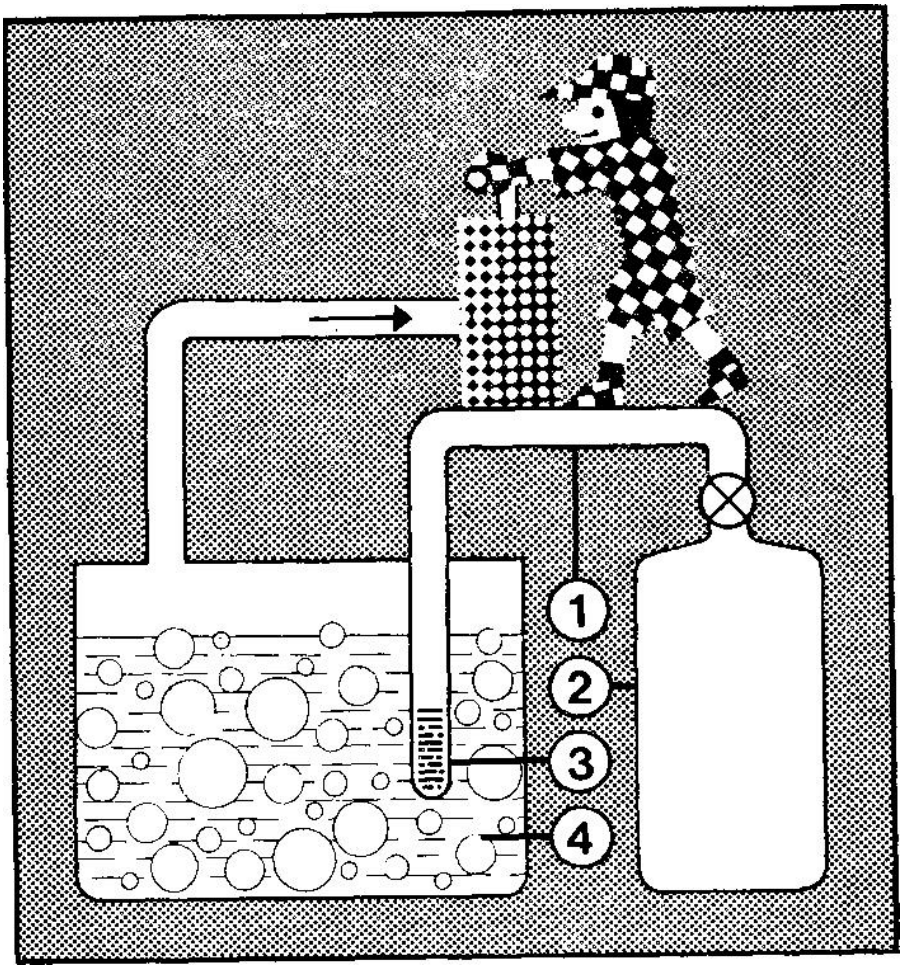


Схема аппарата Вроблевского и Ольшевского: 1— стеклянная трубка с прочными стенками; 2— стальной цилиндр, наполненный кислородом под высоким давлением: 3— сжиженный кислород; 4 — этилен, кипящий при пониженном давлении и температуре 130 °С. Сквозь стеклянную стенку можно было наблюдать, как в аппарате «спокойно» кипела голубоватая жидкость.

Вскоре был получен в устойчивом состоянии и другой сжиженный атмосферный газ — азот.

Продемонстрировав возможность длительного сохранения жидкого кислорода и жидкого азота, польские физики создали предпосылки для исследования этих холодных жидкостей, их практического применения и дальнейшего продвижения по пути к абсолютному нулю.

Воодушевленные своими успехами, Вроблевский и Ольшевский в 1884 году провели серию опытов по сжижению водорода методом Кальете путем расширения. Наблюдаемый при

этом легкий туман они приняли за капли жидкого водорода, но полной уверенности в этом не было, так как туман мог быть следствием какой-либо примеси.

Времена Кальете и Пикте минули. Исследователь, объявивший, что он получил жидкий водород, должен был подтвердить свое заявление более существенными аргументами, чем мимолетное облачко тумана.

Пройти один из наиболее трудных участков пути к абсолютному нулю выпало на долю английского химика и физика Дьюара.

Джеймс Дьюар родился в 1842 году в многодетной семье шотландца — владельца небольшой гостиницы. Он был младшим из семи сыновей. В десятилетнем возрасте Джеймс провалился под лед и в течение нескольких лет после этого происшествия отличался очень слабым здоровьем.

Предоставленный самому себе, мальчик проводил много времени у деревенского столяра, который научил его делать скрипки.

Очевидно, именно тогда у будущего ученого развились ловкость, сноровка и привычка к тонкой физической работе.

Биографы Дьюара отмечают, что в день его золотой свадьбы играли на одной из скрипок, сделанной им самим. На ней была надпись: «Джеймс Дьюар, 1854».

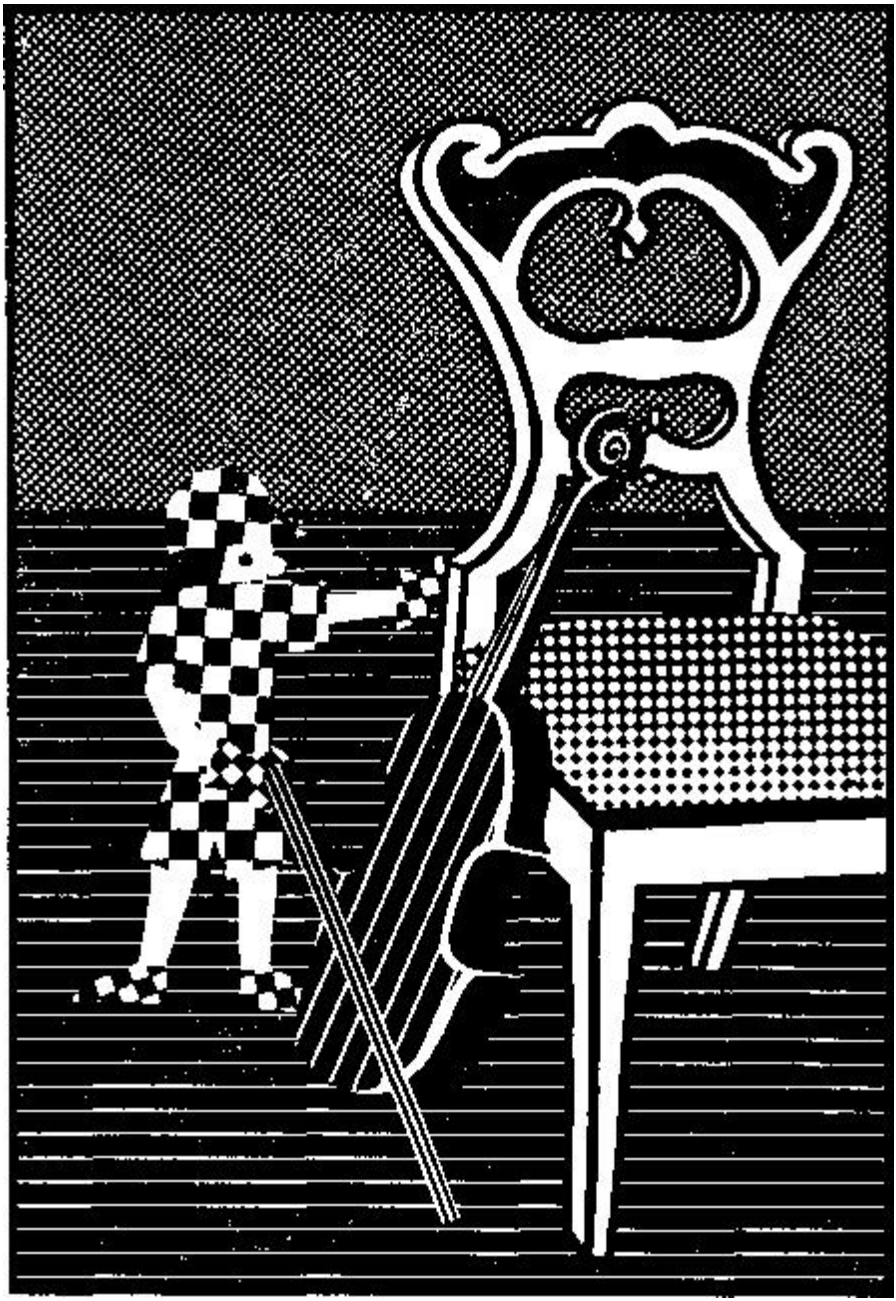
По окончании Эдинбургского университета Дьюар начинает в этом же университете читать лекции по химии. В 1877 году он получает профессуру в Лондонском королевском институте, где работает до последних дней своей жизни.

Научные интересы Дьюара были весьма разнообразны. Но его наиболее выдающиеся достижения относятся к области низких температур.

Узнав о сжижении кислорода, Дьюар выписывает из Парижа аппаратуру и уже летом 1878 года демонстрирует капли жидкого кислорода на своих публичных вечерних чтениях по пятницам.

Работы, проведенные Дьюаром в королевском институте, и его непрерывные демонстрационные опыты наглядно свидетельствовали о том, что сжиженные газы могут и должны «спокойно кипеть в пробирке». Для этого необходимо выполнение двух условий: первое — наличие достаточного количества сжиженного газа, второе — соблюдение предосторожностей, препятствующих немедленному испарению жидкого газа.

Первая проблема к тому времени была уже решена краковскими физиками. Они же наметили путь для решения второй задачи. Напомним, что трубка, в которой сжижался кислород, помещалась в сосуд с жидким этиленом. Образующиеся при испарении этилена холодные пары мешали притоку тепла извне.



Вот тогда в научной терминологии появилось новое слово — криостат (от греческого слова «кри- ос» — холодный). Так стали называть сосуд специальной конструкции, предназначенный для хранения сжиженных газов. Сама же техника получения низких температур получила название криогеники или криогенной техники.

Криостат недолго оставался неразделимой частью

аппаратуры для сжижения газов. Скоро этот процесс был видоизменен, так что жидкость из расширительной емкости выпускали через отводную трубку в криостат, который потом можно было отсоединить от установки. Это значительно упростило манипуляции с жидким газом и облегчило проведение экспериментов.

В ту пору криостат представлял сосуд для жидкого газа, погруженный в стеклянный стакан, который был соединен с сосудом пробкой. Получался резервуар с двойными стенками. На дно стакана помещался сушильный агент (вещество, способное впитывать влагу), поглощающий водяные пары в пространстве между стеклянными стенками, препятствующий таким образом образованию изморози.

Теперь во время чтения лекций Дьюар вносил в лекционный зал жидкий кислород, приготовленный заранее, и демонстрировал его свойства перед слушателями.

За десять лет, прошедших с момента первого удачного опыта сжижения кислорода, техника эксперимента в области криогеники шагнула вперед.

Но исследователей, стремящихся продолжать марш к абсолютному нулю, тревожило одно немаловажное обстоятельство.

Для превращения жидкости в пар требуется некоторое количество тепла, называемое скрытой теплотой парообразования или испарения. Теплота испарения кислорода, в пересчете на один грамм, в десять раз меньше, чем у воды. Поэтому для сохранения кислорода в жидком состоянии более или менее продолжительное время криостат нуждался в хорошей тепловой изоляции. А скрытая теплота испарения водорода, согласно оценке ученых того времени, по крайней мере в четыре раза меньше скрытой теплоты испарения кислорода.

Это означало, что если водород все-таки удастся сжижить, то его нельзя будет сохранить в течение какого-либо времени в криостате применяемой тогда конструкции.

На лекции 20 января 1893 года Дьюар демонстрирует вакуумный сосуд, получивший впоследствии его имя, столь совершенной конструкции, что она осталась неизменной вплоть до наших дней[2].

Читатель уже знает, что первоначально в течение ряда лет применялись криостаты с двойными стенками, пространство между которыми можно было освободить только от водяных паров. Дьюар существенно усовершенствовал конструкцию криостата, откачав воздух из пространства между стенками до глубокого вакуума. В результате резко уменьшился теплообмен

между окружающей средой и веществом, находящимся внутри сосуда. Для уменьшения тепловых потерь посредством излучения поверхности стенок, образующих вакуумное пространство, покрываются тонким слоем серебра и полируются.

На лекции Дьюар с присущим ему артистическим блеском продемонстрировал преимущество своего изобретения по сравнению со старым типом криостата. Сначала он показал жидкий кислород, находящийся в спокойном состоянии, словно обычная вода.

Затем он отломил носик на стеклянном баллоне; как только воздух попал между стенками, жидкий кислород начал интенсивно кипеть.

Изобретение Дьюаром вакуумного сосуда — огромный шаг вперед в технике низких температур.

Возможность длительного хранения жидких газов в сосудах Дьюара позволила теперь исследователям проводить эксперименты со значительно большими количествами жидкого газа, исчисляющимися уже не кубическими сантиметрами, а литрами.

Решив эту проблему, Дьюар смог непосредственно заняться сжижением водорода.

Какие выводы он смог сделать из опыта своих предшественников?

В первом эксперименте Кальете охлаждение достигалось за счет истечения струи газа из сосуда со сжатым газом. Газ расширялся, и его температура понижалась.

Это был процесс до некоторой степени стихийный и неуправляемый. Напомним, что первоначально струя газа вырвалась из сосуда против воли экспериментатора — в результате аварии. Эффективность такого процесса относительно невелика.

А что, если струю не выпускать в атмосферу, а заставлять газ работать?

Так возникла идея детандера.

Что такое детандер? Попросту говоря, это цилиндр с поршнем.

Газ сжимается с помощью специальной машины — компрессора до давления в десятки, а иногда сотки атмосфер. Сжимаясь, газ нагревается, а это как раз и не нужно! После компрессора газ поступает в теплообменник, представляющий собой змеевик, обтекаемый проточной водой. Здесь газ восстанавливает свою первоначальную температуру.

Затем он попадает в детандер, где толкает поршень, совершая при этом механическую работу. В результате расширения в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой происходит уменьшение внутренней энергии газа, и его температура падает.

После охлаждения газ поступает в холодильную камеру. Отнимая тепло у охлаждаемого тела, газ нагревается и возвращается в компрессор, чтобы снова пройти весь цикл.

Наиболее уязвимым местом этого охлаждающего устройства является собственно детандер. Перемещающийся в цилиндре поршень требует смазки. Между тем смазочный материал, не твердеющий при очень низкой температуре, подобрать трудно.

Не менее сложная проблема — создать уплотнение между цилиндром и поршнем, необходимое для предотвращения утечки газа. К тому же детандер- ный способ охлаждения действует тем хуже, чем ниже температура.

Может быть, можно обойтись без поршня и других движущихся частей?

И Дьюар вспоминает об интересном явлении, обнаруженном еще в 1853–1854 годах английскими учеными Джеймсом Джоулем и Уильямом Томсоном и получившем название эффекта Джоуля — Томсона (дроссельного эффекта).

Суть этого эффекта заключается в изменении температуры газа при прохождении через теплоизолированный дроссель, то есть суженное отверстие (пористую перегородку, вентиль), в

направлении от большего давления к меньшему.

Газ проходит через суженное отверстие стационарно: перед дросселем и после него давление должно оставаться постоянным.

До дросселя оно такое, какое создается компрессором, например, десять атмосфер, а после дросселя оно может быть равно, например, одной атмосфере.

Один и тот же газ может иметь при разных температурах и различных начальных давлениях разный по знаку эффект Джоуля — Томсона: положительный (газ охлаждается) или отрицательный (газ нагревается).

Изменение знака эффекта Джоуля — Томсона называется инверсией.

Для большинства газов при комнатной температуре эффект Джоуля — Томсона положителен в широком интервале давлений. Для водорода эффект Джоуля — Томсона в обычных условиях отрицательный. Однако при достаточно низких температурах наступает инверсия: эффект Джоуля — Томсона становится положительным (газ охлаждается).

Забегая вперед, следует заметить, что способ дросселирования и усовершенствованный детандер- ный способ (к нему мы вернемся позже) являются основными для получения холода в современной технике.

Не будем нарушать хронологию повествования.

В начале 1896 года Дьюар публикует статью, где описывает эксперименты с газообразным водородом, осуществленные на его установке, основанной на использовании эффекта Джоуля — Томсона.

Дьюар отмечал, что он не наблюдал никакого охлаждения водорода, когда поступавший в установку газ имел комнатную температуру. Впрочем, ничего другого он не ожидал.

Однако газ, предварительно охлажденный жидким воздухом, поддавался дальнейшему охлаждению. Правда, никаких признаков его сжижения не наблюдалось.

Чтобы показать, насколько низка была температура газообразного водорода, Дьюар направлял струю газа из сопла на жидкий кислород. Последний замерзал, превращаясь в твердое вещество светло — голубого цвета. По оценке Дьюара температура струи была на 20–30 градусов выше абсолютного нуля. Теперь он был уверен, что сжижение водорода вполне осуществимо.

Наконец Дьюар добивается успеха. 10 мая 1898 года он получает 20 кубических сантиметров жидкого водорода, который спокойно кипел в вакуумном сосуде. А еще через год он одерживает свою последнюю победу — переводит водород в

твердое состояние.

Вот как это произошло.

Первые попытки Дьюара получить водород в твердой фазе путем откачки паров из сосуда с жидким водородом потерпели неудачу.

Оказалось, что скрытая теплота испарения водорода еще меньшая, чем это предполагалось раньше. Поэтому приток тепла в криостат извне был достаточно велик, чтобы полностью компенсировать то понижение температуры, которое можно получить, испаряя жидкость.

Тогда Дьюар поместил сосуд с жидким водородом в другой сосуд, наполненный жидким воздухом. Внешний сосуд служил как бы экраном, препятствующим притоку тепла извне в центральную часть криостата.

Когда давление паров над поверхностью жидкого водорода упало до пяти миллиметров ртутного столба, в жидкости появилось некоторое подобие пены, которая при дальнейшей откачке превратилась в прозрачную твердую массу.

Представьте себя в роли участника марафонского бега, который, опередив всех своих соперников, первым пересекает линию финиша. Вы ликуете, но тут подбегает судья и заявляет, что линия финиша перенесена и вам предстоит продолжать утомительный бег.

Примерно в таком положении и очутился Дьюар. Получив жидкий водород, он не сомневался, что сделал последний решающий шаг на пути к абсолютному нулю. Но его собственные последующие эксперименты показали, что он ошибся. Водород не

был газом, имеющим минимальную температуру кипения (по современным данным температура кипения жидкого водорода 20,4К).

Предстоял следующий этап исследования — сжижения гелия.

Гелий принадлежит к так называемым инертным газам. На Земле его содержится очень мало. Впервые он был обнаружен на… Солнце (откуда и его название: по — гречески «гелиос» — «солнце») в 1868 году при спектральном исследовании солнечной короны.

Лишь в 1895 году английскому химику У. Рамзаю удалось обнаружить гелий на Земле, выделив его из минерала клевеита.

В дальнейшем выяснилось, что и некоторые другие минералы, и природные газы содержат в небольших количествах гелий. «Солнечный газ» был обнаружен также в земной атмосфере, но в мизерной концентрации — менее 0,001 %.

Эксперименты показали, что открытое вещество — гелий остается газообразным даже при таких низких температурах, которые соответствуют твердому состоянию водорода. Предварительные оценки, сделанные в то время различными исследователями, показали, что температура кипения гелия лежит между 2К и 6К (по современным данным температура кипения гелия, при нормальном атмосферном давлении, 4,2К).

В 1908 году Дьюар публикует статью, где описывает все сложности, с которыми ему пришлось столкнуться при проведении экспериментов по сжижению гелия. И все же тон статьи — оптимистичный. Дьюар полон надежды добиться успеха.

Однако резким диссонансом с содержанием статьи прозвучало завершающее ее примечание, сделанное уже при корректуре: «10 июля 1908 года доктор Камерлинг — Оннес из Лейденского университета осуществил сжижение гелия». У самого финиша Дьюара обошел его более счастливый соперник.

…В то время как в стенах старинного Яглонского университета в Кракове в трубке аппарата Вроб- левского и Ольшевского «спокойно кипел кисло- ррд», а в Королевском институте в Лондоне на своей лекции по пятницам, словно фокусник на эстраде, Дьюар демонстрировал, как в его сосуде, будто из «ничего», возникали капли жидкости, в одной из аудиторий университета в голландском городе Лейдене собралось несколько молодых людей.

Нет, здесь не демонстрировались эффектные опыты. Не было и аппаратуры, если не считать большой черной доски. Но присутствующие с вниманием следили за рассказом профессора, внешне похожего на их сверстника.

Извилистыми линиями одна за другой ложатся на доску

изотермы[3] реального газа. Лектор соединяет точки на диаграмме, и, словно на географической карте, возникают области различного фазового состояния вещества (газ, жидкость, пар). Рядом ровными строчками выстраиваются формулы.

— Для того чтобы построить изотермы газов, которые мы намерены сжижать, — говорит профессор, — требуется исключительная точность измерений. Отныне девиз «к знанию через измерение» будет начертан на двери нашей лаборатории.

Так закончил профессор свое первое собеседование с молодыми физиками и инженерами, составившими костяк организованной им криогенной лаборатории.

Если бы соревнование на пути к абсолютному нулю проводилось по всем правилам спортивных состязаний, то именно в этот день в судейский протокол должна была бы быть внесена фамилия нового соревнующегося: Гейке Камерлинг — Оннес.

Молодой нидерландский ученый (он родился в 1853 году) уже успел зарекомендовать себя рядом многообещающих работ.

Подобно опытному полководцу, Оннес понимал, что к штурму абсолютного нуля невозможно приступить без серьезной подготовки, без максимальной мобилизации всех наличных людских и материальных ресурсов.

Оннес организовал при своей лаборатории школу

прибористов и стеклодувов. Подготовив квалифицированный вспомогательный персонал, он мог проводить в лаборатории задуманные опыты.

В 1892–1894 годах в лаборатории была сконструирована громадная ожижительная четырехкаскадная установка для кислорода, азота и воздуха. Она была настолько совершенна и имела такую производительность, что смогла удовлетворять потребности Лейденской лаборатории на протяжении более тридцати лет.

Неуклонно продвигается Оннес к цели. Водород в ощутимых количествах он ожижает лишь в 1906 году, спустя восемь лет после Дьюара. Однако Лейденская установка была значительно более надежной и производительной — она выдавала до четырех литров жидкого воздуха в час. По сравнению с ней аппараты Дьюара и Ольшевского выглядели детскими игрушками. Теперь Оннес мог создавать без перебоев огромные количества жидкого воздуха и жидкого водорода.

Оннес сумел получить и необходимое количество чистого гелия, что само по себе было немалым достижением: запасы этого редкого газа на земном шаре в то время оставались весьма и весьма ограниченными.

Наконец час решающего эксперимента пробил.

Небольшой голландский город Лейден славен своими научными традициями.

Недаром его именем назван один из первых физических приборов — лейденская банка, прототип современного конденсатора.

Однако мало кто из лейденских жителей мог предполагать, что в этот день — 10 июля 1908 года — в старинных стенах Лейденского университета происходит событие важного научного значения.

Накануне были заготовлены необходимые для начала эксперимента 75 литров жидкого воздуха.

«5 часов 45 минут утра. Установка настроена на сжижение водорода.

13 часов 30 минут. Завершено сжижение 20 литров водорода, необходимых для использования в гелиевом ожижителе.

16 часов 30 минут. Начинается циркуляция жидкого гелия».

Эти короткие, словно строки боевого рапорта, записи в лабораторном журнале отнюдь не отражают подлинную картину волнующих событий, предшествующих покорению последней крепости на пути к абсолютному нулю.

При предварительном охлаждении аппаратуры с помощью жидкого водорода требовалась исключительная осторожность.

Случайное проникновение в систему ничтожного количества атмосферного воздуха при осуществлении одной из многочисленных операций поставило бы заключительный эксперимент под угрозу срыва.

Войдя в контакт с жидким водородом, воздух мог бы отвердеть и примерзнуть к стеклу гелиевого сосуда, что помешало бы дальнейшему наблюдению. Но этого не случилось. Тщательно отлаженная аппаратура работала безукоризненно.

Во внутреннем криостате ожижителя в качестве индикатора был размещен особый термометр, показывающий, насколько успешно проходит эксперимент.

В течение длительного времени индикатор почти не смещался, и создавалось впечатление, что нет даже малейшего признака охлаждения. Проводились всевозможные манипуляции с регулированием расширительного клапана и корректировкой давления, пока наконец не было замечено постепенное снижение температуры. Казалось, что температура центрального сосуда падает медленно и скачкообразно, а затем снижение температуры и вовсе прекратилось. И хотя уже был израсходован весь имеющийся в наличии жидкий водород, никакого признака сжижения гелия не наблюдалось.

Трудно описать уныние, охватившее всех участников эксперимента. Похоже было на то, что попытка сжижения гелия потерпела крах.

Между тем университет весь день жил слухами, что идет выдающийся эксперимент, и коллеги Оннес а устремились в его лабораторию, чтобы собственными глазами увидеть, как обстоит дело.

Когда стало казаться, что эксперимент обречен на неудачу, один из профессоров университета высказал догадку, что отсутствие отклонения индикатора объясняется тем, что он погружен в кипящую жидкость.

— Может быть, гелий всё-таки сжижен, но его просто не видно? — спросил он.

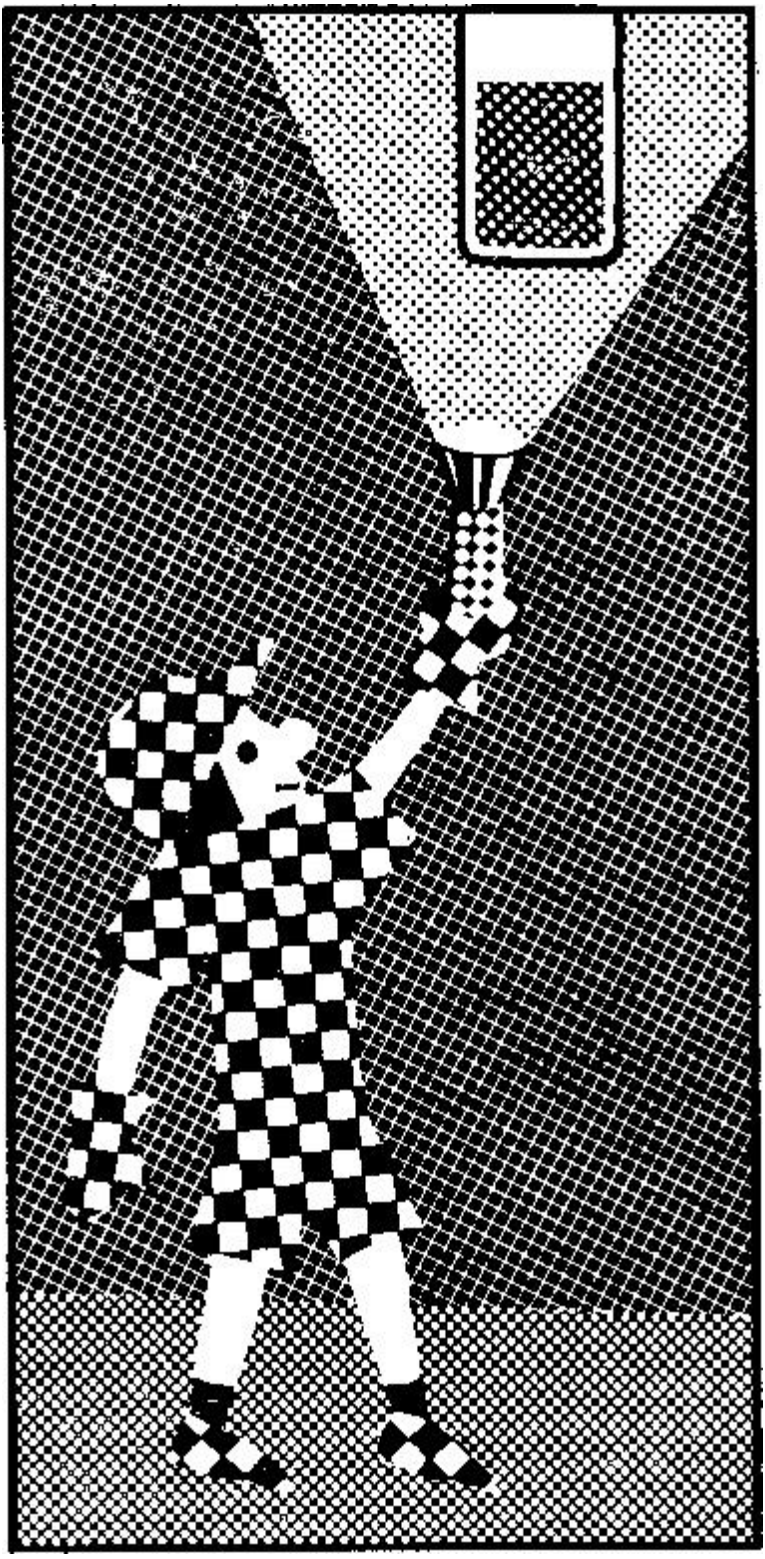
К счастью, одному из участников эксперимента пришла в голову мысль осветить сосуд снизу. И вдруг неожиданно появился уровень жидкости, теперь ясно различимый благодаря отра — женйю света снизу. Центральный сосуд был почти полностью заполнен жидким гелием.

Последняя крепость на пути к абсолютному нулю была взята.

В первом эксперименте было получено более 60 кубических сантиметров жидкого гелия.

Перед завершением опыта Оннес сделал попытку получить гелий в твердом состоянии, осуществляя дальнейшее понижение

температуры путем уменьшения давления в объеме, где кипела жидкость. С этой целью он испарял жидкость до тех пор, пока ее осталось лишь 10 кубических сантиметров. Затем подсоединил криостат к сильному вакуумному насосу, понижающему давление над кипящей жидкостью до одной сотой атмосферного. И… никаких признаков затвердения гелия!



В следующем, 1909 году Оннес вернулся к попытке получить твердый гелий. Ему удалось снизить давление пара над жидкостью до двух миллиметров ртутного столба, что соответствовало 1,38К. Затем, используя более мощные вакуумные насосы, он довел давление до 0,2 миллиметра ртутного столба, снизив температуру жидкого гелия до 1,04К. Еще через несколько лет, используя батарею из двенадцати новых диффузионных насосов, он довел температуру до 0,83К. Увы, гелий «не хотел» переходить в твердое состояние даже при таких температурах!

Оннесу не суждено было дожить до того момента, когда эта загадка была окончательно объяснена.

Но интерес Оннеса и его школы к проблеме достижения очень низких температур несколько ослаб после того, как в 1911 году в исследовательской работе Лейденской лаборатории появилось существенно новое направление.

Имея в своем арсенале новую область температур, так называемые «гелиевые температуры», Ка- мерлинг — Оннес приступил к исследованию свойств веществ в температурном интервале от нескольких кельвинов до абсолютного нуля.

Измерение, которое можно было сравнительно легко провести при столь низких температурах, заключалось в определении электрического сопротивления провода. Вопрос о величине электрического сопротивления чистых металлов при низких температурах к тому времени приобрел важное значение.

Немецкий физик Вальтер Нернст высказал предположение, что при понижении температуры электрическое сопротивление чистого металла должно постепенно уменьшаться, совсем исчезая при абсолютном нуле.

Этим же вопросом занимался Дьюар, проводивший измерения при температуре жидкого азота. Он обнаружил, что сопротивление платины при понижении температуры падает с меньшей скоростью, чем предполагалось.

Считалось, что этот результат подтверждает другую теорию, согласно которой носители заряда при абсолютном нуле должны быть прочно связаны с атомами. Следовательно, электрическое сопротивление при самых низких температурах должно быть бесконечно большим.

Итак, существовали две взаимно противоположные точки зрения. Чему же, в конце концов, должно быть равно электрическое сопротивление при абсолютном нуле: нулю или бесконечности? При таких обстоятельствах к попыткам решить эту проблему подключился Камерлинг — Оннес.

Оннес начал эксперименты с той стадии, на которой их

окончил Дьюар: он приступил к определению сопротивления платины уже при гелиевых температурах.

Результаты сначала были мало обнадеживающими: они не подтверждали и не опровергали никакую теорию. Электрическое сопротивление ни падало, ни росло при понижении температуры — оно оставалось постоянным. Оннес заметил, что абсолютная величина сопротивления в его экспериментах не зависит от температуры — она меняется от образца к образцу, и чем чище металл, тем ниже сопротивление. Скорее всего, прав был Нернст, решил Оннес, и сопротивление должно уменьшаться при снижении температуры, но этому препятствуют примеси.

Надо уничтожить примеси. Оннес знал, что золото легче очистить от примесей, чем платину, и он приступил к экспериментам с проводами из самого чистого золота, которое ему удалось достать. Хотя полученные при измерениях значения сопротивления были много ниже, чем у платины, однако и на сей раз сопротивление золота падало с увеличением степени его чистоты.

Но разве исчерпаны все возможности? Ведь существует и другой металл, который можно получить в еще более чистом виде, чем золото. Это ртуть.

Поскольку ртуть при комнатной температуре находится в жидком состоянии, ее можно перегонять вновь и вновь сколько угодно раз, пока не будет достигнута требуемая степень чистоты.

В середине 1911 года Оннес проводит эксперимент, всю значимость которого оценили лишь много лет спустя.

На следующей странице изображена кривая зависимости электрического сопротивления ртути от температуры, построенная на основании результатов этого эксперимента. С понижением температуры сопротивление ртути постепенно уменьшается — кривая более или менее плавно снижается. Вот температура упала до точки кипения гелия, вот она стала чуть меньше.

Что произойдет дальше? Может быть, кривая, в соответствии с теорией Нернста, будет так же плавно снижаться вплоть до абсолютного нуля температуры?

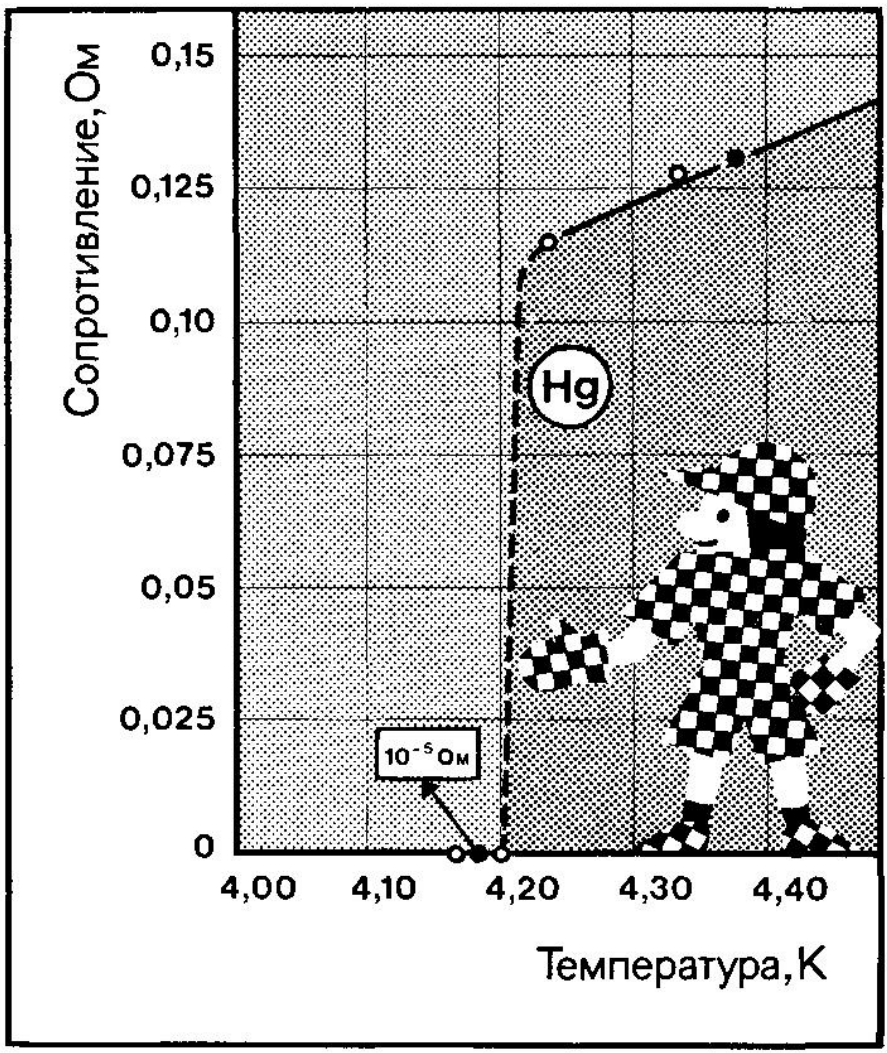
Может быть, наоборот, кривая круто повернет вверх, устремляясь в бесконечность, как это следовало бы ожидать из результатов Дьюара?

Оказывается, при температуре несколько ниже точки кипения гелия кривая резко повернула вниз, словно провалившись в пропасть. Электрическое сопротивление ртути внезапно исчезло.

Ученый снова и снова повторял эксперимент: ход кривой повторялся с завидным постоянством.

С тех пор в науку вошло новое понятие — сверхпроводимость — явление скачкообразного исчезновения электрического сопротивления металла при охлаждении его до достаточно низкой температуры.

Вскоре оказалось, что явление сверхпроводимости присуще не только ртути, но и олову, свинцу, некоторым другим металлам и сплавам, причем каждый из них имеет свою температуру перехода в сверхпроводящее состояние, которую принято называть критической температурой.



Открытие сверхпроводимости. График иллюстрирует удивительное поведение кривой зависимости, электрического сопротивления ртути от температуры вблизи абсолютного нуля. Резко поворачивая вниз, кривая устремляется в манящую своей

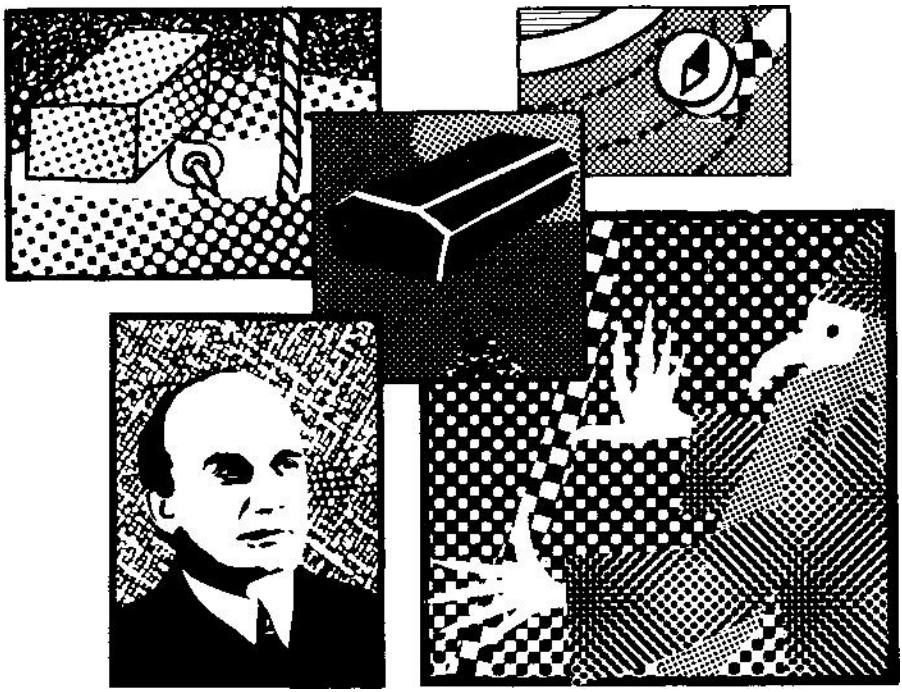
загадочностью область сверхпроводимости.

Так завершился продолжавшийся почти сто лет марш первопроходцев в область абсолютного нуля.

Камерлинг — Оннес, первый проникший в эту область, сделал одно из самых выдающихся открытий XX века. Он обнаружил совершенно новое свойство вещества, скрытое ранее в области очень низких температур, — сверхпроводимость.

В 1913 году Оннесу была присуждена Нобелевская премия по физике «За исследование свойств материи при низких температурах, которое привело, между прочим, к получению жидкого гелия». В 1925 году он был избран членом — корреспонден- том Академии наук СССР.

4. Как измерить «ничего». Вечное движение. Привередливые сверхпроводники. «Гроб Магомета». Заколдованный круг.



Мы говорим, что сверхпроводимость характеризуется исчезновением электрического сопротивления. Но если сопротивление «исчезает», то как его измерить?

Физики на слово не верят. Между тем каждый, даже самый точный физический прибор обладает некоторой погрешностью измерения. Если, к примеру, стрелка амперметра, включенного в электрическую цепь, стоит на нуле, то не спешите делать вывод, что в цепи нет никакого электрического тока. Вы можете только сказать, что ток в цепи не превышает некоторую, пусть очень малую величину, определяемую чувствительностью прибора (эта величина обычно указывается в паспорте прибора).

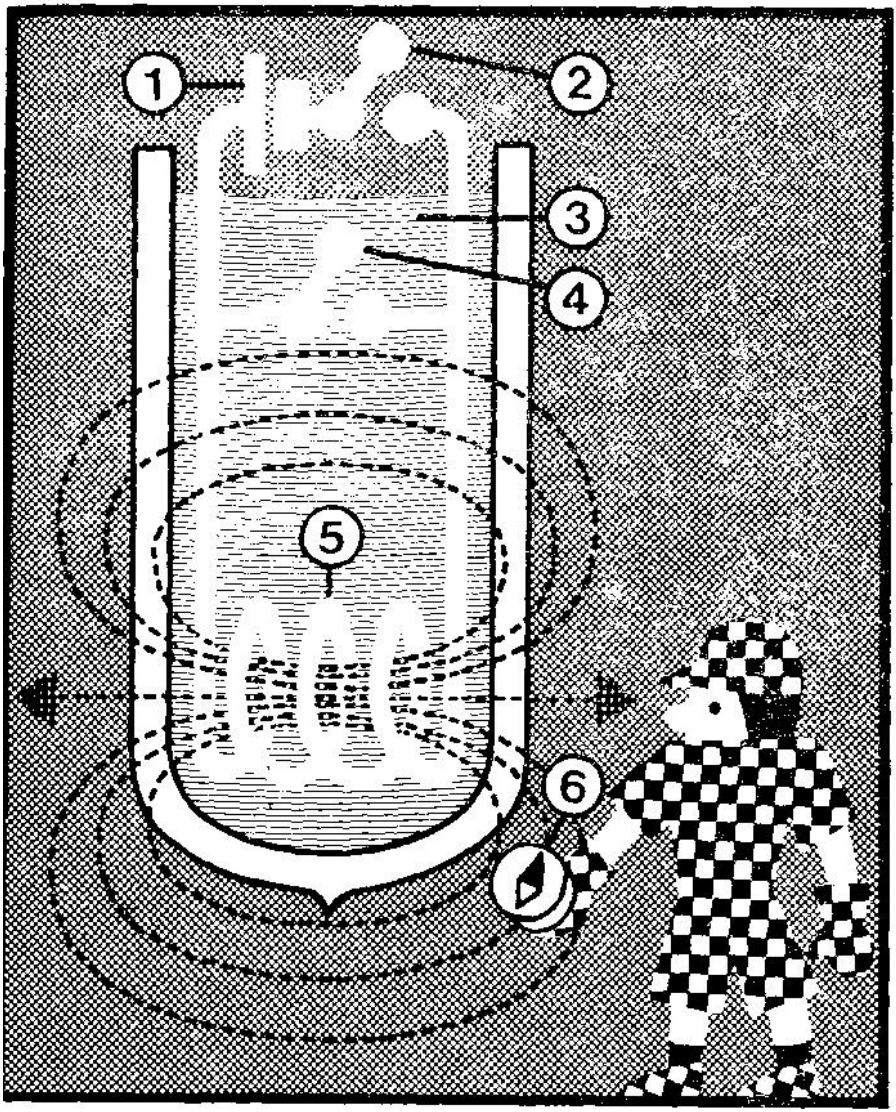
Каким же образом Камерлинг — Оннесу удалось измерить исчезновение электрического сопротивления?

Оннес изготовил катушку из свинцового провода и поместил ее в сосуд Дьюара, заполненный жидким гелием. Катушка охладилась до сверхпроводящего состояния. Она была подключена через первый ключ к электрической батарее, а с

помощью второго, сверхпроводящего ключа катушку можно было замыкать накоротко. В начале эксперимента первый ключ был замкнут, а второй разомкнут. При этом ток, возбуждаемый батареей, проходил через катушку, создавая вокруг нее магнитное поле. Под влиянием этого поля отклонялась стрелка магнитного компаса, расположенного вне сосуда Дьюара. Затем второй ключ замыкался, а первый размыкался. Таким образом, свинцовая обмотка оказалась замкнутой накоротко. Однако стрелка компаса оставалась отклоненной, показывая, что ток все еще протекал через обмотку, хотя она теперь от батареи не питалась.

Если бы обмотка обладала каким-нибудь, даже очень малым электрическим сопротивлением, то ток в катушке постепенно уменьшался бы во времени, или, как говорят физики, затухал, вплоть до его полного исчезновения.

Но ничего подобного не произошло. В свинцовой обмотке все время циркулировал электрический ток. И до тех пор пока через несколько часов жидкий гелий в сосуде Дьюара полностью не испарился и обмотка перестала быть сверхпроводящей, не было ни малейшего изменения отклонения стрелки.



Исчезновение электрического сопротивления: 1 — батарея; 2 — первый ключ; 3 — жидкий гелий; 4— второй ключ; 5— свинцовая катушка; 6— стрелка магнитного компаса. В сверхпроводящей катушке при замкнутом ключе 4 циркулирует незатухающий электрический ток.

«Незатухающий», как его принято называть, электрический ток оставался неизменным.

В дальнейшем Оннес сделал свой эксперимент еще более простым и наглядным.

Представьте себе свинцовое кольцо. Введите в него постоянный магнит, и в отверстии кольца возникнет магнитное

поле. Теперь охладите кольцо до состояния сверхпроводимости. Стоит вам вынуть магнит из кольца, как в результате изменения внешнего магнитного поля в сверхпроводящем кольце возникнет незатухающий электрический ток. В этом можно убедиться с помощью той же стрелки компаса.

Оннес повторял свои эксперименты, повторяли после него и другие исследователи. Но у них была более совершенная аппаратура, применялись более чувствительные измерительные приборы и опыты длились более продолжительное время.

Еще в пятидесятых годах нынешнего века в одной из зарубежных лабораторий наблюдали циркуляцию незатухающего тока в сверхпроводящем кольце в течение двух с половиной лет. По истечении этого периода эксперимент пришлось прервать. Из-за забастовки транспортных рабочих прекратилось снабжение лаборатории жидким гелием.

Даже спустя два с половиной года после начала эксперимента не было зафиксировано ни малейшего ослабления тока в кольце.

По современным оценкам удельное электрическое сопротивление сверхпроводника в 100 миллионов триллионов раз меньше, чем у медного провода при комнатной температуре. Это значит, что ток, возбужденный в сверхпроводящем кольце, способен протекать без затухания в течение 15 миллиардов лет.

Поэтому мы очень близки к истине, считая, что электрическое сопротивление сверхпроводника равно нулю.

Уже первые опыты со сверхпроводящими цепями убедили исследователей в том, что они столкнулись с удивительным явлением, практическое использование которого обещает сказочные перспективы.

Казалось, что по сверхпроводящим проводам и кабелям можно передавать электрический ток на сколь угодно большие расстояния без потерь.

Мыслилось, что свинцовая сверхпроводящая обмотка, подобная использованной в первых экспериментах Камерлинг — Оннеса по сверхпроводимости, идеально подходит для создания сильных магнитных полей. Ведь в случае обычного проводника с током мощность расходуется на тепловые потери.

Мощные сверхпроводящие магниты и трансформаторы без потерь, так же как и другие виды электрических машин, имеющих сверхпроводящие обмотки, сулили грандиозные возможности.

Однако, оказалось, стоит напряженности магнитного поля превысить некоторое «критическое» значение, как явление сверхпроводимости исчезает; катушка становится обычным проводником.

Поскольку всякий ток создает магнитное поле, существует

критическая величина тока, текущего по сверхпроводнику, при которой происходит разрушение сверхпроводимости. При этом критическое магнитное поле для чистых металлов обычно не превышало сотых долей тесла — величину, меньшую той, которая требуется даже для небольших электрических машин.

Но интерес исследователей к такому удивительному явлению, как сверхпроводимость, не ослаб.

К ртути, свинцу и олову вскоре прибавились новые сверхпроводники: индий, галлий и таллий. Эти металлы по своим физическим свойствам похожи друг на друга: они мягки, их температуры плавления невысоки.

Вскоре сверхпроводники были обнаружены и среди более тугоплавких и твердых металлов… Это тантал, ниобий, титан и торий.

Когда был сжижен гелий, газ с самой низкой температурой кипения, и откачаны над ним пары, казалось, что самая низкая возможная температура уже достигнута.

Однако, после того как в 1926 году был открыт так называемый метод магнитного охлаждения, появилась возможность проникнуть в область еще более низких температур. Здесь исследователей ждали новые открытия.

Но прежде разберем вкратце, в чем заключается сущность метода магнитного охлаждения.

Частицы (атомы, ионы, молекулы) парамагнитного вещества ведут себя как маленькие магнитики.

Из-за теплового движения эти магнитики ориентированы совершенно беспорядочно.

Правда, при низких температурах, когда тепловое движение ослаблено в значительной степени, силы взаимодействия между магнитиками могут заставить их расположиться правильным образом. Но если магнитики находятся далеко друг от друга, то силы взаимодействия не хватает для наведения порядка и магнитный беспорядок сохраняется до самых низких температур.

Такие явления наблюдаются в очень сложных по своему составу парамагнитных солях, в которых, кроме магнитных частиц, есть много других немагнитных частиц, например в цериевомагниевом нитрате. В этом веществе магнитиками являются только ионы церия. Но на каждый ион церия приходится примерно 60 других, немагнитных атомов.

Магнитики так сильно разбавлены немагнитными частицами, что беспорядок в ориентации ионов церия сохраняется даже при очень низких температурах.

В парамагнитном веществе беспорядок может изменяться не только при изменении его температуры, но и при изменении его

магнитного состояния.

Если парамагнитную соль поместить в постоянное магнитное поле, то все магнитики — ионы выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля. Таким образом, наводится порядок в ориентации ионов. Если это поле убрать, снова создается беспорядок.

Практически магнитное охлаждение осуществляется следующим образом (см. схему на стр. 72).

Парамагнитную соль, находящуюся в ампуле а, заполненной газообразным гелием, помещают в сосуд с жидким гелием, температура которого равна примерно 1К, расположенный в магнитном поле между полюсами электромагнита (1).

Газообразный гелий в ампуле обеспечивает хороший тепловой контакт с жидким гелием. Таким образом, температура парамагнитной соли совпадает с температурой окружающего жидкого гелия.

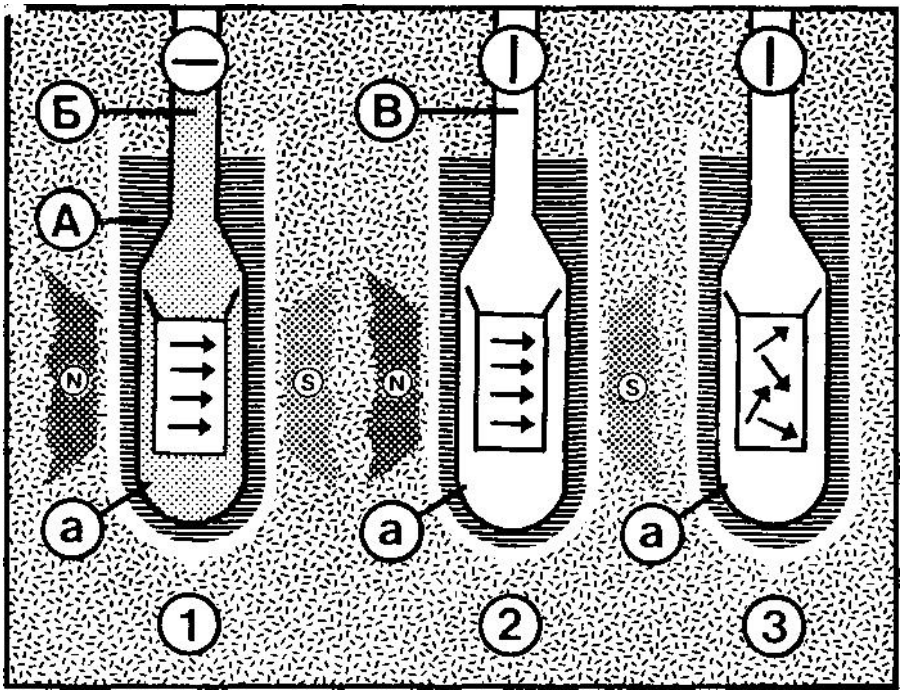
Затем из ампулы откачивают газообразный гелий, обеспечив тем самым теплоизоляцию соли от окружающей среды (2).

Потом отключают магнитное поле, что ведет к разориентации магнитиков (3).

На разориентацию магнитиков расходуется энергия теплового движения ионов, что приводит к дальнейшему охлаждению соли.

С помощью этого метода можно получить температуры, лишь на тысячные доли кельвина отличающиеся от абсолютного нуля. В современной технике чаще применяется другой, более удобный способ охлаждения до температур, приближающихся к абсолютному нулю, о котором вы прочтете в главе седьмой.

В интервале «магнитных температур» (от 1К и ниже) была обнаружена новая серия сверхпроводников: кадмий, иридий, рутений, титан и другие.



Магнитное охлаждение: а — ампула; А — жидкий гелий; Б — газообразный гелий; В — вакуум. 1 — под действием магнитного поля магнитики — ионы парамагнитной соли, охлажденной жидким гелием, выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля; 2— откачкой газообразного гелия достигается теплоизоляция соли от окружающей среды; 3— при отключении магнитного поля происходит разориентация магнитиков и дальнейшее охлаждение соли.

Теперь остается представить читателю известные на сегодня сверхпроводящие элементы.

Для этого рядом с названием элемента указываются два числа: критическая температура в кельвинах (К) и критическое магнитное поле в теслах (Т), в тех случаях, когда оно известно.

Алюминий	К	Т
	1,19	0,01
Бериллий	0,026	-
Ванадий	5,3	0,14
Вольфрам	0,015	0,11
Галлий	1,09	0,006
	6,5	0,056
	7,5	0,95

Но почему около галлия стоят сразу три пары чисел?

Оказывается, некоторые элементы существуют в виде двух или большего количества простых веществ, отличающихся друг от

друга, например, структурой кристаллической решетки. В науке это явление известно под названием аллотропии (от греческого — «другое свойство»).

Разные аллотропические формы одного и того же элемента могут иметь разные критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние и разное критическое магнитное поле.

Но продолжим наш «парад».

	К	Т
Индий	3,4	0,03
Иридий	0,14	0,002
Кадмий	0,55	0,003
Лантан	4,8	0,08
	6,0	0,16
Молибден	0,92	0,01
Ниобий	9,2	0,2
Олово	3,72	0,03
	5,3	
Осмий	К	Т
	0,65	0,006
Протактиний	1,3	—
Рений	1,7	0,02

Следующий элемент мог бы по праву занять место правофлангового. Ведь именно с него началась история сверхпроводимости.

	К	Т
Ртуть	4,15	0,04
	3,95	0,03

Замыкают нашу «колонну»:

	К	Т
Рутений	0,5	0,007
Свинец	7,2	0,08
Таллий	2,39	0,002
Тантал	4,49	0,08
Технеций	7,8	0,14
Титан	0,39	0,01
Торий	1,37	0,016
Уран	0,2	-
Цинк	0,9	0,005
Цирконий	0,55	0,0047

У читателя, впервые ознакомившегося со списком сверхпроводящих элементов, может мелькнуть мысль, что в нем кое-что пропущено.

Действительно, где такой элемент, как серебро, удельное

сопротивление которого меньше, чем у всех других веществ? А где медь, которая благодаря своему низкому электрическому сопротивлению является прекрасным материалом для электрических проводов? А золото?..

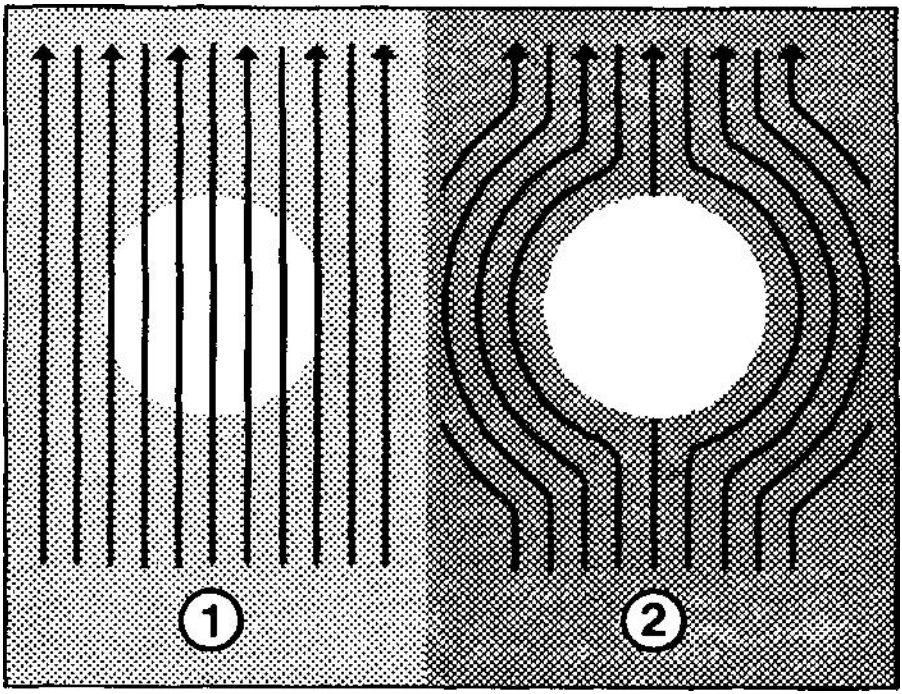
Но увы! По данным, которыми располагают ученые сегодня, ни серебро, ни медь, ни золото, ни некоторые другие металлы и сплавы, являющиеся хорошими проводниками при комнатной температуре, никаких признаков сверхпроводимости не проявляют даже при охлаждении до сколь угодно низкой, доступной нам температуры.

Кроме рассмотренных элементов, существуют и другие, более «привередливые» сверхпроводники. Им низкой температуры мало! Для перевода в сверхпроводящее состояние одновременно с охлаждением их необходимо подвергнуть давлению. К таким сверхпроводникам относятся, например, германий и кремний.

В 1933 году ученый мир потрясло открытие в области сверхпроводимости, сделанное берлинскими физиками В. Мейснером и Р. Оксенфель- дом, получившее название эффекта Мейснера.

Чтобы понять сущность эффекта Мейснера, вспомним, что обычный металл, находящийся в магнитном поле, пронизывается силовыми линиями магнитного поля.

Иная картина наблюдается у сверхпроводящего металла, помещенного в слабое магнитное поле. При температуре ниже критической силовые линии магнитного поля полностью выталкиваются из сверхпроводника. Индукция поля в толще сверхпроводника равна нулю. В этом и заключается эффект Мейснера.

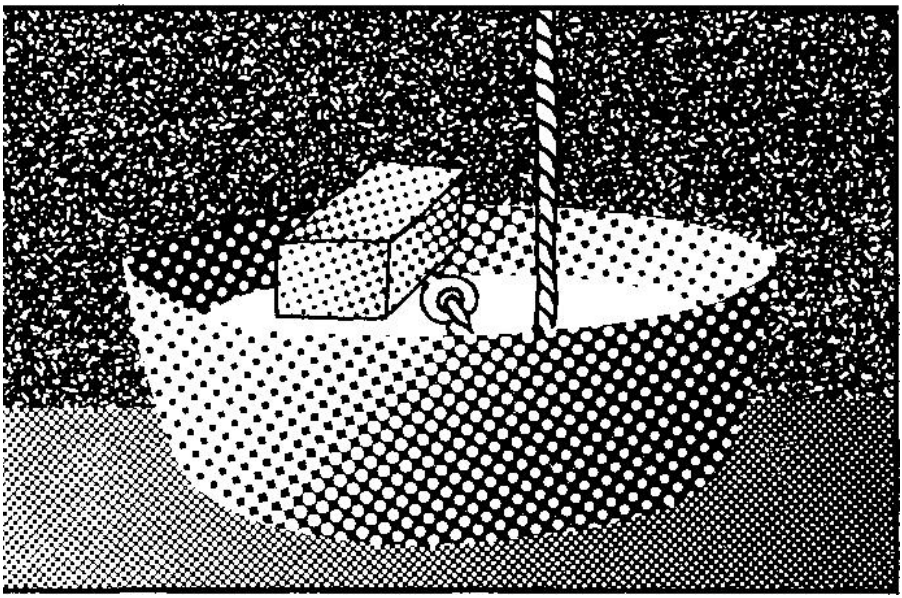


Эффект Мейснера: 1 — при температуре выше критической магнитные силовые линии пронизывают толщу сверхпроводника; 2 — при температуре ниже критической магнитные силовые линии выталкиваются из толщи сверхпроводника.

Изучая эффект Мейснера, следует обратить внимание на то, что магнитная индукция равна нулю именно в толще сверхпроводника. В его поверхностном слое толщиной от 10 до 100 нанометров (один нанометр равен одной миллиардной доли метра) возникает постоянный электрический ток, текущий без сопротивления.

Собственное магнитное поле тока, текущего в поверхностном слое сверхпроводника, противоположно внешнему магнитному полю. Происходит полная компенсация, что приводит к нулевому значению индукции поля в толще сверхпроводника.

Представьте себе сверхпроводящую свинцовую чашу с жидким гелием.



Магнитик парит над сверхпроводящей чашей, подобно гробу Магомета из старинного предания.

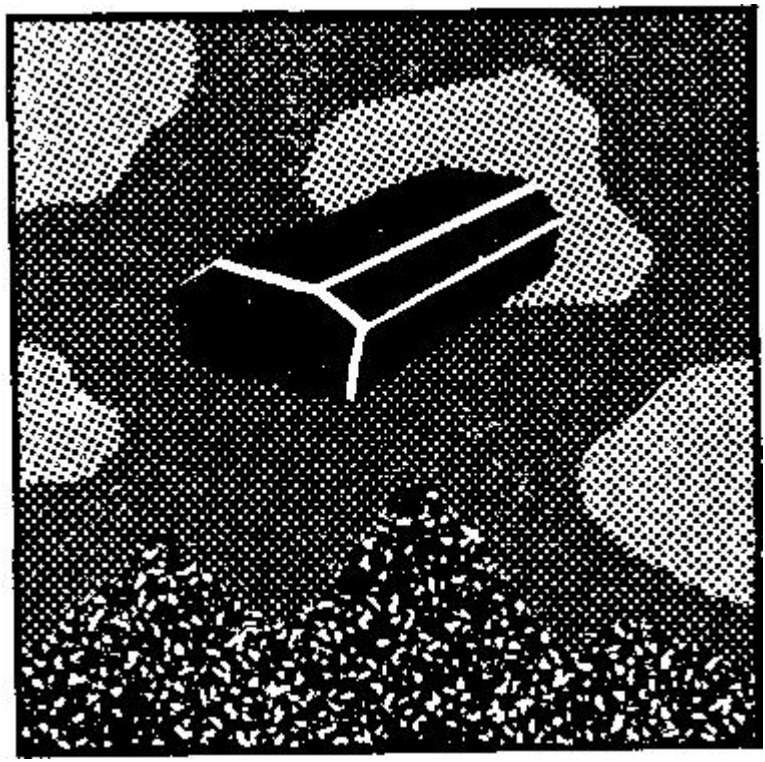
Вы опускаете в чашу закрепленный на цепочке небольшой брусковый магнит.

Ниже… Еще ниже. Постепенно словно какая-то неведомая сила подхватывает магнитик, и он уже самостоятельно «парит» над чашей.

В чем причина этого явления?

Магнитное поле магнитика индуцирует незатухающий ток на поверхности сверхпроводящей свинцовой чаши, который в свою очередь возбуждает магнитное поле. По закону Ленца это поле стремится оттолкнуть магнитик. Когда сила отталкивания сравнивается с силой тяжести, магнитик начинает парить в воздухе.

Этот остроумный эксперимент, впервые в мире проведенный в 1945 году профессором Московского государственного университета Владимиром Константиновичем Аркадьевым, получил шуточное название «гроб Магомета», по аналогии со старинной легендой о гробе Магомета, который парил в воздухе без всякого подвеса.



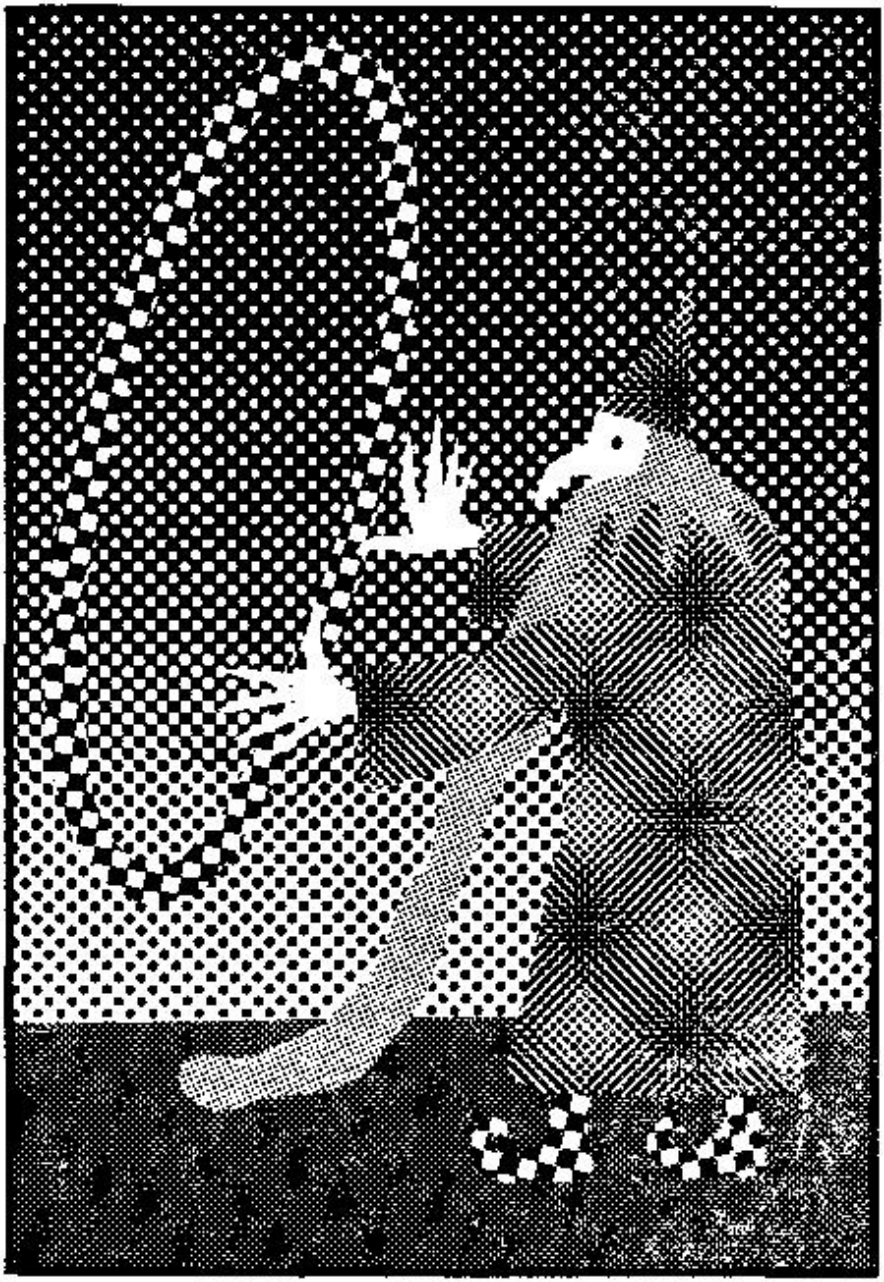
Впрочем, настоящий гроб Магомета вряд ли мог парить над сверхпроводящей свинцовой чашей, каких бы она ни была размеров. Чем больше вес магнита, тем более сильное магнитное поле должно его удерживать, а читатель уже знает, что существует критическая величина напряженности магнитного поля, при которой сверхпроводимость разрушается, и эта величина для свинца достаточно мала.

Сверхпроводящее кольцо, по которому протекает незатухающий ток, оказалось «заколдованным кругом». Увеличение тока развеивало «чары» сверхпроводимости.

Это было очень досадно, и исследователи продолжали «колдовать» над сверхпроводимостью.

В начале 30–х годов иностранным ученым, работающим в области низких температур, стало известно, что наряду с такими центрами криогенной техники, как Лейден, Кембридж, Берлин, существует и… Харьков.

Здесь в марте 1931 года при Украинском физико — техническом институте по инициативе и с участием его директора, выдающегося советского физика, впоследствии академика, Ивана Васильевича Обреимова, была организована первая в Советском Союзе специализированная криогенная лаборатория.



Ее возглавил молодой физик Л. В. Шубников.

Лев Васильевич Шубников родился 29 сентября 1901 года в Петербурге. В 1926 году он окончил Ленинградский политехнический институт, получив квалификацию инженера — физика.

Еще в студенческие годы Шубников проявил незаурядные способности к проведению исследовательских работ. После окончания института его направляют по путевке Наркомпроса в Лейденскую криогенную лабораторию имени Камерлинг — Оннеса.

С трепетом переступил молодой исследователь порог этого старинного центра криогенной техники, где свято хранились традиции его основателя, человека, первым вступившего в область абсолютного нуля температуры.

Как здесь встретят вчерашнего студента, приехавшего познавать азы криогенной техники?

Шубников совместно с голландским физиком Де Хаазом приступил к исследованиям электрических свойств кристалла висмута в магнитном поле при низких температурах. Они открыли новое, ранее неизвестное явление — периодическое изменение электрического сопротивления висмута в зависимости от магнитного поля. Это явление получило название «эффект Шубникова — Де Хааза».

По возвращении на родину Шубников приложил немало

усилий, чтобы обеспечить харьковскую лабораторию современным криогенным оборудованием. Были установлены водородный и гелиевый ожижители и другая аппаратура. В новом криогенном центре начались интенсивные исследования проблемы сверхпроводимости.

В 1934 году Лев Васильевич Шубников и Юрий Николаевич Рябинин независимо от Мейснера и Оксенфельда открыли эффект равенства нулю магнитной индукции в толще сверхпроводника.

«Ну и что же? — может спросить читатель. — Ведь они были не первыми».

Немецкие исследователи открыли этот эффект, изучая картину магнитного поля в окрестности сверхпроводника. Харьковским физикам удалось измерить магнитное поле внутри сверхпроводника, впервые предоставив неопровержимое доказательство существования эффекта Мейснера.

В то время некоторые исследователи, разочаровавшись в попытках получить достаточно сильные магнитные поля с помощью сверхпроводников из чистых металлов, решили обратиться к сплавам. Тут неожиданный успех сопутствовал голландским физикам Де Хаазу и Винду. В 1930 году они получили сплав свинец — висмут с критическим магнитным полем 2 тесла. Это была уже существенная величина.

Но эксперименты не всегда давали одинаковые результаты. Сплав, о котором было известно, что он имеет относительно высокое критическое поле, при повторных экспериментах вдруг начинал «капризничать». Критическое магнитное поле оказывалось неожиданно низким.

Считалось, что чем чище каждый отдельный сверхпроводящий металл, тем у него выше критическое магнитное поле. По аналогии пытались создавать возможно более чистые сплавы. Однако, как потом выяснилось, этот путь был ошибочным.

Шубников был первым ученым, пришедшим к мысли о существовании разницы между сверхпроводимостью чистых металлов и сверхпроводимостью сплавов.

Тщательные экспериментальные исследования, проведенные Шубниковым и его сотрудниками в 1934–1937 годах, подтвердили эту догадку.

Разрушение сверхпроводимости сплавов происходит при значительно более сильных магнитных полях, чем у чистых металлов.

В 1938 году молодой московский физик — экспериментатор, впоследствии академик, Александр Иосифович Шальников сделал еще одно интересное открытие в области сверхпроводимости.

Осадив методом распыления металл на поверхность стеклянной пластины, охлажденной жидким гелием, ученый получил сверхпроводящую пленку с большим критическим током.

Виртуозно поставленными экспериментами Шальников продемонстрировал способность сверхпроводящих пленок выдерживать значительно более сильные магнитные поля, чем массивные сверхпроводники.

Работами Шубникова, Шальникова и ряда других советских и иностранных ученых в конце тридцатых годов были заложены основы технической сверхпроводимости.

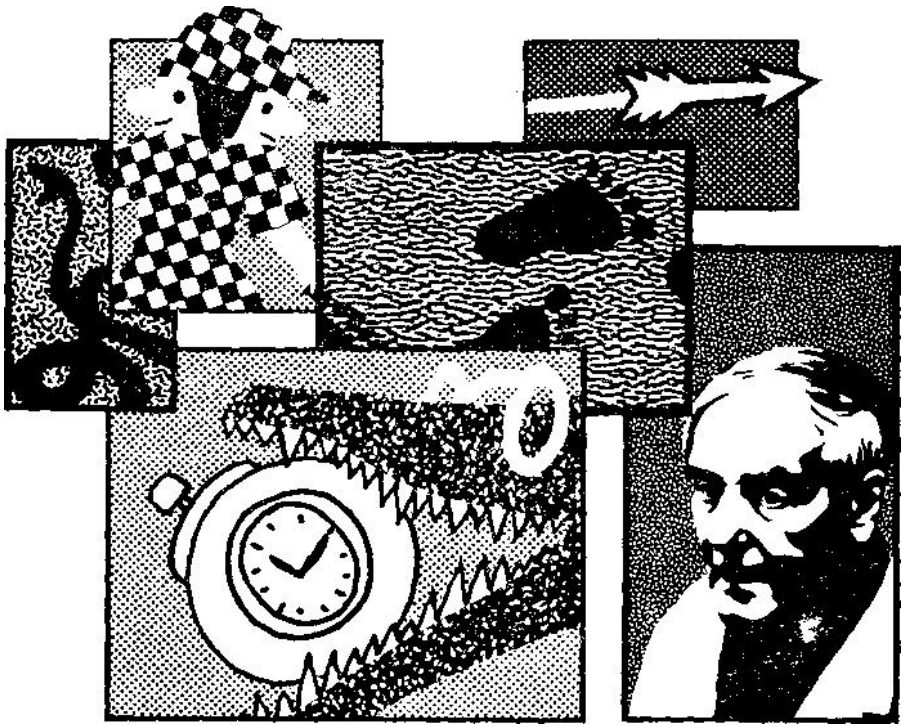
Однако говорить о практическом применении сверхпроводников тогда было еще рано.

Предстояло глубоко осмыслить процессы, происходящие в удивительном мире сверхпроводимости. К тому же сама физическая природа сверхпроводимости продолжала оставаться неясной.

Между тем произошло событие, по своей значимости сопоставимое с открытием сверхпроводимости.

О нем — в следующей главе.

5. Загадки жидкого гелия. Невидимка оставляет мокрые следы. Рассерженные змеи. Двуликий Янус. Есть вязкость, и нет вязкости. Современный рог изобилия.



Гейке Камерлинг — Оннес, первый в 1908 году получивший гелий в жидком виде, до конца своей жизни был чрезвычайно удручен тем обстоятельством, что ему никак не удавалось перевести эту жидкость в твердое состояние.

Исследуя жидкий гелий, он столкнулся с рядом не менее загадочных обстоятельств.

Оказалось, например, что при температуре 2,2К удельная теплоемкость жидкого гелия вдруг резко увеличилась. Этот результат был до того неожиданным и непостижимым, что Оннес решил его не опубликовывать: боялся прослыть мистификатором.

Загадки жидкого гелия интриговали не только лейденского исследователя.

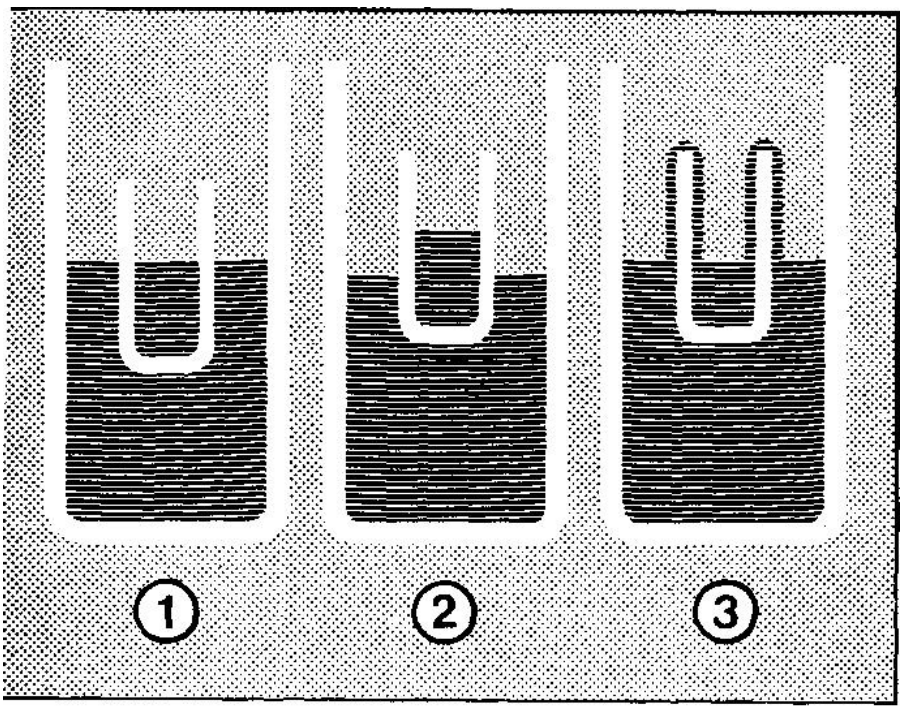
«Солнечный газ», казалось, поставил себе целью удивить землян. Правда, при охлаждении ниже 4,2К он сначала ведет себя как обычная жидкость. «Чудеса» начинаются с понижением

температуры до 2,2К. В этот критический момент резко меняется внешний вид сжиженного гелия — он внезапно перестает кипеть по всему объему и превращается в спокойную «мертвую» жидкость, испаряющуюся только на открытой поверхности и обладающую к тому же рядом поразительных свойств.

Представьте себе два открытых только сверху сосуда, расположенных один внутри другого и заполненных жидкостью, уровень которой в обоих сосудах одинаковый (рис. 1). Поднимем внутренний сосуд относительно внешнего так, чтобы он занял положение, изображенное на рисунках 2 и 3.

Если проводить этот опыт с обычной жидкостью, то ее уровень во внутреннем сосуде станет выше уровня во внешнем сосуде (рис. 2). Такое состояние будет сохраняться в течение весьма длительного времени.

Если подобный эксперимент провести с жидким гелием, охлажденным до достаточно низкой температуры, то, изменяя положение одного сосуда относительно другого, мы не сможем сделать уровни жидкости различными. Она каким-то образом переходит из одного сосуда в другой, и уровни в сосудах становятся одинаковыми (рис. 3).



Удивительное поведение жидкого гелия, охлажденного до достаточно низкой температуры. Словно влекомая какой-то неведомой силой, жидкость переходит из сосуда в сосуд.

Вполне возможно, что человека, проделавшего такой опыт в средние века, предали бы сожжению на костре. Но в наш век наука ищет материалистическое объяснение подобных «чудес».

На протяжении тридцати лет десятки и сотни исследователей провели тысячи экспериментов с жидким гелием.

Они наблюдали поразительное изменение его свойств при глубоком охлаждении.

Первым, кто произнес «магическое» слово, объясняющее природу чудесного превращения жидкого гелия, был выдающийся советский ученый — физик П. Л. Капица.

Это слово: «Сверхтекучесть».

…Петр Леонидович Капица родился 8 июля 1894 года в Кронштадте.

Его отец — Леонид Петрович, инженер в чине генерала, участвовал в строительстве Кронштадтской крепости. Мать — Ольга Иерони- мовна была педагогом и детской писательницей.

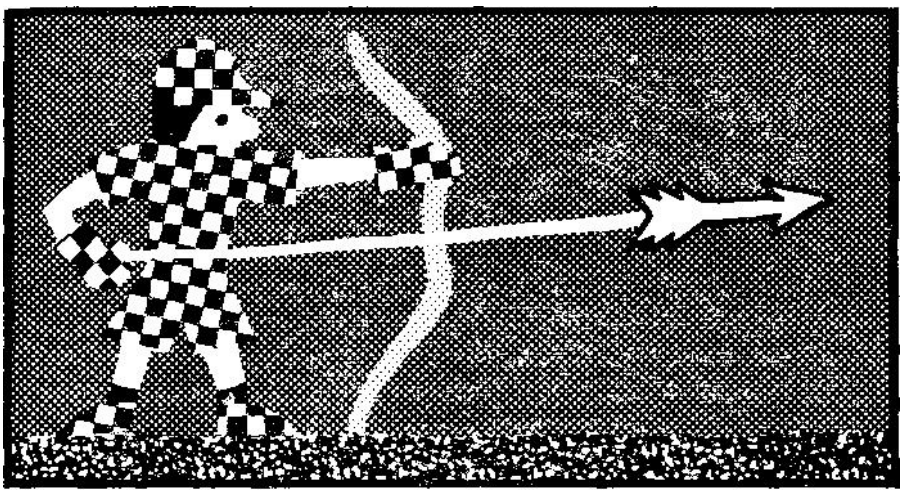
Уже во время учебы в Кронштадтском реальном училище

Капица проявил способности: склонность к физике и электротехнике. Он получил свободный доступ в физический кабинет училища, где проводил физические и химические опыты и ремонтировал приборы.

В 1912 году Капица поступил в Петербургский политехнический институт. В то время физической лабораторией этого института заведовал Абрам Федорович Иоффе. Он обратил внимание на способного и трудолюбивого студента, привлек Капицу к работе в лаборатории.

Первая научная статья Капицы «Приготовление волластоновских нитей» была опубликована в 1916 году в «Журнале русского физического общества». В ней описан оригинальный метод изготовления тончайших кварцевых нитей для физических приборов.

По методу Капицы нити протягивались путем… стрельбы из лука. После обмакивания стрелы в расплавленный кварц натягивали тетиву. Увлекаемая стрелой кварцевая нить застывала на лету и падала на подостланное полотно.



Такое весьма своеобразное изготовление волла- стоновских нитей свидетельствовало о склонности молодого исследователя к оригинальным и удивительно простым решениям технических проблем. Эта особенность ученого ярко проявилась в его последующих работах.

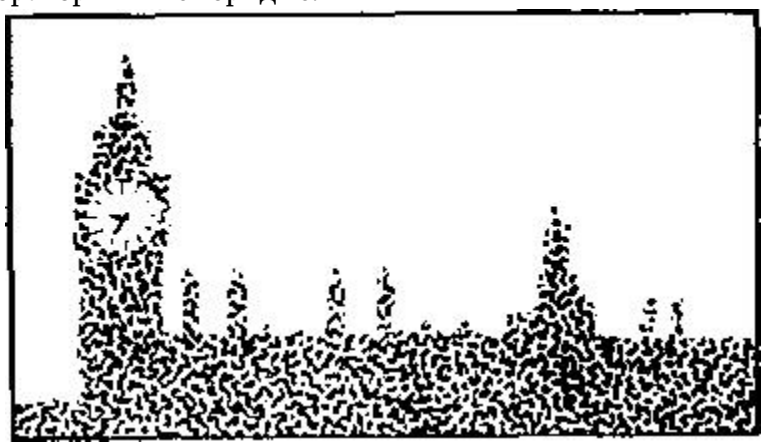
В 1918 году, по окончании политехнического института, Капица остается в нем преподавателем и одновременно работает в одном из первых научно — исследовательских учреждений Советской России, известным ныне под названием ордена Ленина Физико — технический институт имени А. Ф. Иоффе.

Этот институт сыграл выдающуюся роль в развитии советской

физики. Его основатель и первый директор Иоффе создал научную школу, воспитавшую многих видных ученых — физиков.

В 1921 году советское правительство по инициативе В. И. Ленина приняло решение направить за границу нескольких петроградских ученых. В числе первых «полпредов» советской науки был и Капица.

В мае 1921 года Капица приезжает в Англию и вскоре приступает к практическим занятиям в Кавендишской лаборатории в Кембридже.



В то время эта лаборатория, возглавляемая «отцом» ядерной физики Эрнестом Резерфордом, считалась одним из мировых научных центров. Ученые из многих стран стремились сюда попасть для приобретения опыта в казавшейся тогда фантастической области ядерной физики.

Каким образом Капица оказался в этом «храме науки»?

Вот что писал Петр Леонидович в июле 1922 года, вскоре после поступления в Кавендишскую лабораторию, своей матери Ольге Иеронимовне:

«Представь себе молодого человека, приезжающего во всемирно известную лабораторию, находящуюся при университете, самом аристократическом, консервативном в Англии, где обучаются королевские дети. И вот в этот университет принимается этот молодой человек, никому не известный, плохо говорящий по — английски и имеющий советский паспорт. Почему его приняли? Я до сих пор этого не знаю. Я как-то спросил об этом Резерфорда. Он расхохотался и сказал: «Я сам был удивлен, когда согласился вас принять, но, во всяком случае, я очень рад, что сделал это…»

Знаменитый ученый не ошибся в своем выборе.

Каждый поступающий в Кавендишскую лабораторию должен был пройти физический практикум, рассчитанный на два года. Капица, ко всеобщему удивлению, сдал зачеты за две недели.

Резерфорд довольно скоро оценил достоинства своего русского ученика и стал поручать ему ответственные задания.

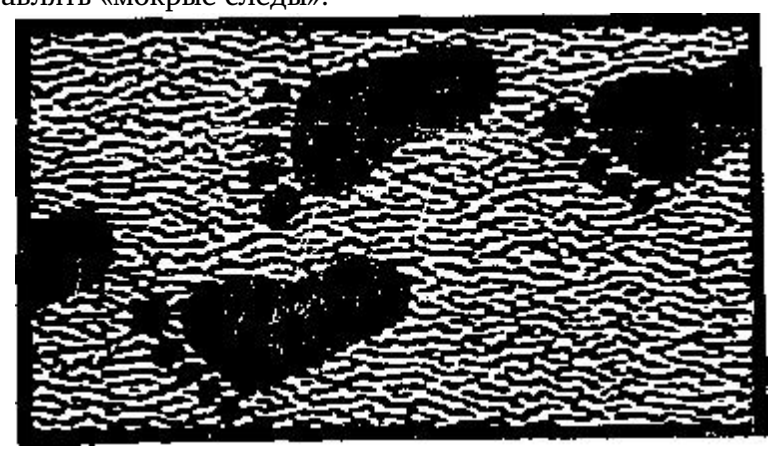
Разумеется, главным направлением работы лаборатории были атомные исследования.

Уже немало было известно о «невидимках» — обитателях этого удивительного микромира.

Но существует ли невидимка на самом деле? До поры до времени скептики говорили: «Да, все ваши расчеты правильны. Но мы привыкли доверять лишь собственным глазам. И мы поверим только после того, как вы покажете нам самого невидимку».

Напомним, что герой научно — фантастического романа Г. Уэллса «Человек — невидимка» был обнаружен по следам, которые он оставлял на влажной почве.

Мы не знаем, как все обстояло в действительности, но вполне возможно, что молодой английский физик Г. Вильсон, прочитав упомянутый роман, воскликнул: — И наш невидимка может оставлять «мокрые следы»!



В 1912 году Г. Вильсон сконструировал свою знаменитую камеру, которую его восторженные современники назвали «окном в атомный мир». Принцип действия камеры Вильсона заключается вкратце в следующем.

Заряженная частица (например, электрон), попадая в герметичную камеру, заполненную газом (гелием, азотом или аргоном) и насыщенным паром воды или этилового спирта, сталкиваясь с молекулами газа, ионизирует их, образуя таким образом вдоль своего пути цепочку ионов.

Если в этот момент резко понизить температуру внутри камеры путем расширения газа (для чего одна из стенок камеры делается подвижной), то пар становится перенасыщенным и происходит конденсация пара на ионах как центрах конденсации. При этом вокруг ионов образуются капельки тумана видимых

размеров, которые можно наблюдать и фотографировать, обнаруживая тем самым следы частиц.

Но одно дело регистрировать путь движения микрочастиц, другое дело уметь управлять ими. И Капица приступает к решению следующей по своей сложности задачи. Ему предстояло измерить импульс альфа — частиц, выделяющихся при радиоактивном распаде. Для этого надо было значительно искривить траекторию альфа — частицы, поместив камеру Вильсона в сильное магнитное поле. Но техника тех дней не знала способов создания магнитных полей, достаточно мощных для такой цели.

Тогда исследователи получали сильные магнитные поля с помощью электромагнита, состоящего из катушки с проводом и железного сердечника.

Пределом было поле 5 тесла. Превысить эту величину не удавалось.

Пытались увеличить размеры установки.

Парижский физик Коттон построил гигантский электромагнит весом 100 тонн, израсходовав при этом несколько миллионов золотых франков.

Эффект был мизерный.

Напряженность поля удалось повысить лишь на 25 % по сравнению с обычным лабораторным магнитом.

Капица избрал другой путь. Он использовал соленоид — катушку без сердечника. В соленоиде нет предела, обусловленного магнитным насыщением железа. Беда заключается в том, что для соленоида требуется гораздо более сильный ток, чем для электромагнита, и тут вступает в действие тепловой эффект тока. Предел роста напряженности магнитного поля наступает быстро. При дальнейшем увеличении силы тока соленоид расплавляется.

Известно, что тепловое действие тока зависит от времени. И Капица использует фактор времени.

Он пропускает через соленоид очень сильный электрический ток почти мгновенно, импульсно — в течение сотой доли секунды. За столь короткий промежуток времени катушка не успевает расплавиться, но его достаточно для проведения измерений.

Так в экспериментальную технику вошел метод мощных импульсных полей.

О результате эксперимента Капица рассказал в письме к матери от 29 ноября 1922 года:

«…Вот лежит фотография — на ней только три искривленных линии — полет альфа — частицы в магнитном поле страшной

силы… Странно: всего три искривленные линии! Крокодил очень доволен этими тремя искривленными линиями. Правда, это только начало работы, но уже из этого первого снимка можно вывести целый ряд заключений, о которых прежде или совсем не подозревали, или же догадывались по косвенным фактам… Ко мне в комнату — в лабораторию — приходило много народу смотреть три искривленные линии, люди восхищались ими…»

В этом письме Крокодилом Капица называет Резерфорда.

Дело в том, что Резерфорд обладал громким голосом и не умел им управлять. Рокотание могучего баса шефа, встретившего кого-либо в коридоре, предупреждало сотрудников лаборатории о его приближении.

Это дало Капице основание прозвать Резерфорда «Крокодилом», очевидно, по аналогии с героем популярной английской детской книжки — Крокодилом, проглотившим будильник. Тикание этого будильника предупреждало детей о приближении страшного зверя.

Примечательно, что Резерфорд знал об этом прозвище и не обижался. Большой ученый понимал чувство юмора.

Сначала Капица в качестве источника тока использовал аккумулятор малой емкости.

Затем этот аккумулятор был заменен построенным по специальному проекту синхронным генератором.

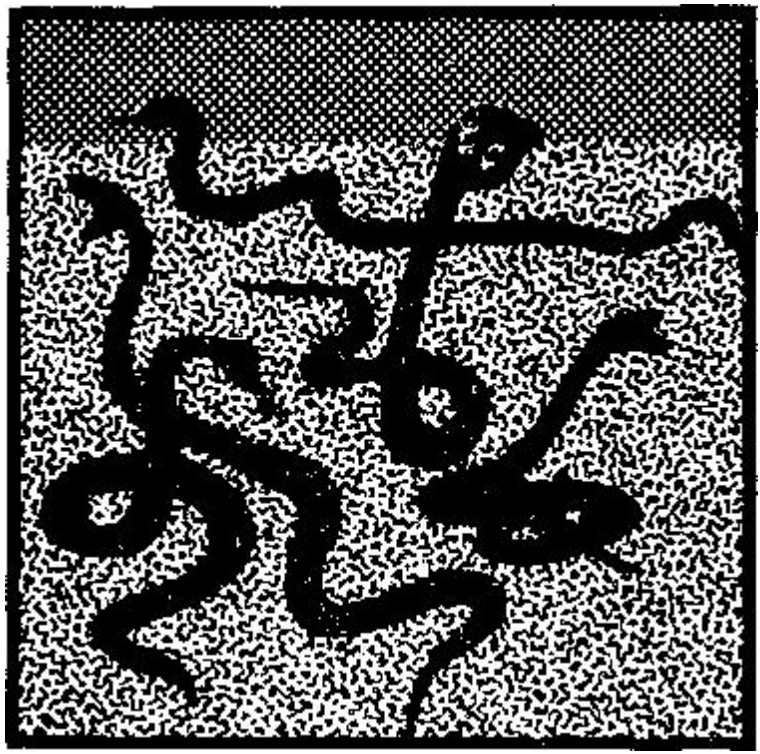
В конструировании этой уникальной машины, содержащей

массивный ротор весом в две с половиной тонны, вращающийся со скоростью полторы тысячи оборотов в минуту, принимал участие сам Капица. С помощью такой установки он получал импульсные поля величиной свыше 30 тесла, превысив в шесть раз предел, достигнутый техникой того времени. Впоследствии, продолжая опыты в Москве, он добился еще более высокого поля — 50 тесла.

Появление установок Капицы явилось переломным моментом в истории Кавендишской лаборатории. В период основания этот старинный научный центр расценивался современниками как некое «чудо техники». Но проходили годы, и в практике проведения физических исследований здесь существенных усовершенствований не наблюдалось. Они осуществлялись с помощью достаточно простых средств.

Капица создавал новый научно — технический фундамент физических исследований с применением достижений техники, сильного электрического тока, мощных магнитных полей.

О том, какое впечатление произвела лаборатория Капицы на «отца» кибернетики, известного американского математика Норберта Винера, свидетельствуют следующие строки из его воспоминаний: «…В Кембридже была все же одна дорогостоящая лаборатория, оборудованная по последнему слову техники. Я имею в виду лабораторию русского физика Капицы, создавшего специальные мощные генераторы, которые замыкались накоротко, создавая токи огромной силы, пропускающиеся по массивным проводам; провода шипели и трещали, как рассерженные змеи, а в окружающем пространстве возникало магнитное поле колоссальной силы… Капица был пионером в создании лабораторий — заводов с мощным оборудованием…»



В 1924 году П. Л. Капица вступил в должность помощника директора Кавендишской лаборатории по магнитным исследованиям. Овладев техникой возбуждения мощных магнитных полей, он приступает к решению еще одной задачи: изучению поведения металлов и полупроводников в магнитном поле.

Такого рода исследования обычно проводятся при низких температурах, и Капице понадобились жидкие водород и гелий.

Читатель помнит, сколько усилий пришлось затратить Камерлинг — Оннесу и его сотрудникам для того, чтобы получить лишь несколько десятков кубических сантиметров жидкого гелия. В то время техника сжижения газов недалеко шагнула вперед.

Правда, Капице для его опытов нужно было не так уж много жидкого газа, и никто не бросил бы ему и слова упрека, если бы он использовал для этой цели существующие в то время в Кембридже сжижительные установки. Но ученый предвидит, какую роль призваны сыграть в науке и технике жидкие газы, имеющие низкие температуры кипения, и приступает к самостоятельному решению проблемы сжижения газов.

Капица начал с детандерного ожижителя гелия. Это было очень смелое решение.

В то время казалось, что возможности детандера,

представляющего собой цилиндр с поршнем (на-< помним, что о нем речь шла в третьей главе), полностью исчерпаны.

Поршень требует смазки, а при такой низкой температуре, при которой сжижается гелий, все смазочные материалы, как и вообще все жидкости, затвердевают.

Но Капица и на этот раз находит простое и оригинальное решение задачи. Смазку поршня должен осуществлять… сам сжижаемый газ!

В детандере своей конструкции Капица оставляет небольшой зазор, порядка нескольких сотых миллиметра, между поршнем и стенкой цилиндра. Сжатый газ пытается ускользнуть через этот зазор. Но поршень производит расширение так быстро, что успевает просочиться только маленькое количество гелия.

Так были одновременно решены две проблемы: смазка и уплотнение поршня.

Быстродействующие детандеры конструкции советского ученого получили распространение во всем мире.

Сжижение атмосферных газов можно было, как выражаются производственники, «поставить на поток».

Наступила новая эра в криогенике.

Признание выдающихся научных и инженерных достижений Капицы выразилось, в частности, в том, что его избрали членом Лондонского королевского общества.

В 1929 году П. Л. Капица был избран членом — корреспондентом Академии наук СССР (с 1939 года он действительный член Академии наук СССР).

Масштаб исследований в области низких температур, проводимых Капицей, все расширялся. В 1932 году на территории Кавендишской лаборатории была построена специальная криогенная лаборатория Лондонского королевского общества, так называемая Мондская лаборатория, директором которой был назначен П. Л. Капица.

Осенью 1934 года Капица возвратился в Москву. Уникальное оборудование Мондской лаборатории было по решению советского правительства закуплено у Лондонского королевского общества. Его смонтировали во вновь организованном научно-исследовательском институте, возглавленном П. Л. Капицей.

По предложению Капицы новое научное учреждение было названо так: «Институт физических проблем».

«Это несколько необычное название, — говорил Капица, — должно отражать собой то, что институт не будет заниматься какой-либо определенной областью знания, а будет, вообще говоря, институтом, изучающим известные научные проблемы, круг которых определится тем персоналом, теми кадрами ученых,

которые в нем будут работать».

П. Л. Капица сам разработал проект вверенного ему института и принимал непосредственное участие в руководстве его строительством. Это было совсем нелегким делом: не хватало строительных материалов, мало было квалифицированных рабочих — строителей.

Наконец организационные трудности были преодолены, и Капица смог продолжить криогенные исследования.

Прежде всего надо было усовершенствовать существующую аппаратуру. Время неумолимо движется вперед, и техника не терпит застоя.

А что, если вместо возвратно — поступательного движения поршня, непрерывное вращение колеса? Газ, работая, теряет энергию и охлаждается. Так возникла идея турбинного детандера, или, сокращенно, турбодетандера.

— Использовать турбину для сжижения газов? Невероятно! Такая машина, если ее и удастся осуществить, будет иметь слишком маленький коэффициент полезного действия, — в один голос заявляли видные турбостроители.

Однако и на этот раз Капица — физик подсказал Капице — инженеру удачное решение задачи.

При разработке конструкции турбодетандера Капица учел, что воздух при низкой температуре ближе к жидкости, чем к газу. Построенный им в 1938 году турбодетандер реактивного типа с радиальным ходом газа больше похож на гидротурбину, чем на газовую турбину. Этот турбодетандер имеет достаточно большой коэффициент полезного действия 0,85.

Новые машины для сжижения газов отличались компактностью. Например, турбодетандер, имеющий ротор весом всего 250 граммов, обладает производительностью 600 кубических метров жидкого воздуха в час. А из жидкого воздуха достаточно просто получить кислород и азот — газы, которые жадно «вдыхает» промышленность. Без кислорода немыслимо выплавить высококачественную сталь, он питает реактивные двигатели, широко применяется в ряде других отраслей промышленности. Жидкий азот и жидкий воздух используются в машиностроении. Сейчас даже студенты на физическом практикуме в некоторых институтах получили возможность использовать для своих опытов жидкий гелий.

…Ученый в который раз наблюдал, как кипящая по всему объему жидкость, мгновенно преобразившись, мирно покоится в сосуде.

Получается так, что жидкий гелий, подобно римскому божеству Янусу, обладает двумя обличиями.

Выше температуры 2,2К существует гелий, который ведет себя как обычная «нормальная» жидкость, его назвали гелий I. Ниже этой температуры гелий приобретает необычные свойства. Его наименовали гелий II.

Уже были тщательно измерены многие характеристики гелия II. Особенно поразили ученый мир результаты экспериментов, проведенных в Лейдене нидерландскими физиками — отцом и дочерью В. и Т. Кеезомами. Оказалось, что разность температур между концами заполненного гелием II капилляра выравнивается чрезвычайно быстро. Расчеты показали, что теплопроводность гелия II превышает в три миллиона раз теплопроводность гелия I и в сотни раз больше, чем у самых теплопроводных веществ из существующих в природе — серебра и меди. В этом смысле о гелии II можно говорить как о сверхтеплопроводящей жидкости.

Капица еще и еще раз перепроверял все имеющиеся данные.

«Только когда работаешь в лаборатории сам, своими руками проводишь исследования, только при этом условии можно

добиться настоящих успехов в науке. Чужими руками хорошей науки не сделаешь», — напишет впоследствии Капица в одной из своих статей…

Ученому предстояло установить, какие свойства этой удивительной жидкости являются первичными, а какие вторичными.

Одним из основных свойств жидкости является ее вязкость, то есть способность оказывать сопротивление при перемещении одной части жидкости относительно другой. Количественно это свойство характеризуется коэффициентом вязкости.

Один из способов измерения вязкости заключается в измерении скорости вытекания жидкости из капилляра под действием силы тяжести.

Скорость жидкости имеет наибольшую величину в средней части капилляра и убывает при приближении к стенке. Различные слои жидкости движутся с разными скоростями: между ними действуют силы трения, от величины которых зависит скорость вытекания.

Проведя тщательные эксперименты по измерению вязкости жидкости таким способом, Капица установил, что гелий II протекает через капилляры диаметром в сто тысячные доли сантиметра практически без сопротивления.

Для того чтобы повысить чувствительность метода, Капица заменил капилляр длинной узкой щелью шириной в полмикрометра, через которую можно было пропускать большие массы жидкости. Через такую щель гелий I протекал едва заметно, а гелий II преодолевал это препятствие за несколько секунд.

Измерения показали, что вязкость гелия II не превышает одну триллионную долю пуаза[4], что, по крайней мере, в десять тысяч раз меньше вязкости наименее вязкого из всех известных в природе веществ газообразного водорода.

Практически гелий II — жидкость с нулевой вязкостью.

Это открытое ученым в 1938 году замечательное свойство гелия II Капица назвал сверхтекучестью.

Пройдет сорок лет. Капица завершит свои исследования свойств гелия II. Но жизнь ставит перед пытливыми исследователями все новые задачи.

Капица исследует природу шаровой молнии, разрабатывает новое направление в технике — электронику больших мощностей, усиленно работает над проблемой номер один современной физики — освоением управляемых термоядерных реакций. В решении этих и многих других проблем он добивается выдающихся результатов. Заслуги ученого высоко оценены

советским правительством и мировой научной общественностью. Дважды ему присуждается Государственная премия I степени. Он дважды Герой Социалистического Труда. Международные награды: золотая медаль Ломоносова, премия Максвелла, медаль Фарадея, Большая золотая медаль Франклина, золотая медаль Нильса Бора и другие.

О своих криогенных исследованиях Капица, по собственному полушутливому признанию, начал забывать.

…В один из осенних дней 1978 года на стол директора Института физических проблем референт, как обычно, положил увесистую кипу корреспонденции. Тут свежие номера отечественных и зарубежных научных журналов, письма зарубежных коллег, многословные служебные циркуляры… Среди них не сразу можно было разглядеть небольшой телеграфный бланк.

Вот что выстучал бесстрастный телетайп:

> «Дорогой академик Капица!
>
> Мне доставляет удовольствие сообщить Вам, что Шведская королевская академия наук решила сегодня присудить Нобелевскую премию по физике в двух равных частях. Одну часть решено присудить Вам за Ваши фундаментальные исследования в области физики низких температур, а другую часть поровну разделить между доктором Арно Пензиас и доктором Робертом Уилсоном (США) за открытие ими фонового микроволнового излучения из космоса.
>
> О. Б. Бернард, генеральный секретарь».

Вернемся, однако, к дням, ставшим ныне достоянием истории.

В то время, когда Капица у себя в лаборатории наблюдал, как через узкую щель с почти молниеносной быстротой проскакивал проворный гелий II, канадские физики из Торонто исследовали вязкость этого вещества другим способом, который заключается в измерении времени затухания крутильных колебаний диска, подвешенного на упругой струне в жидком гелии.

Жидкость вблизи диска увлекается его движением, а вдали практически находится в состоянии покоя. Различные слои жидкости перемещаются с разными скоростями, и возникающая при этом сила внутреннего трения приводит в конце концов к тому, что энергия колебаний превращается в тепло. Зная время затухания колебаний диска, можно определить вязкость.

Эксперименты, проведенные канадскими физиками, показали, что гелий II имеет вполне определенную и измеряемую

вязкость.

В чем же здесь дело?.. Неужели это потому, что климат в Канаде отличается от московского?

Капица повторяет эксперименты своих канадских коллег, и крутильные колебания диска затухают с такой же интенсивностью, как и в далеком Торонто.

Это, пожалуй, единственный случай в науке, когда измерения одной и той же физической величины разными методами дали диаметрально противоположные результаты.

Выходит, что гелий II имеет вязкость и… не имеет вязкости.

Неожиданным был результат и следующего опыта Капицы.

Гелий II выпускали из сосуда через узкую щель. Оказалось, что жидкость в сосуде каким-то непостижимым образом нагревается, а вытекающий гелий, наоборот, охлаждается. Создавалось впечатление, что гелий II, покидая сосуд, «великодушно» оставляет там свое тепло.

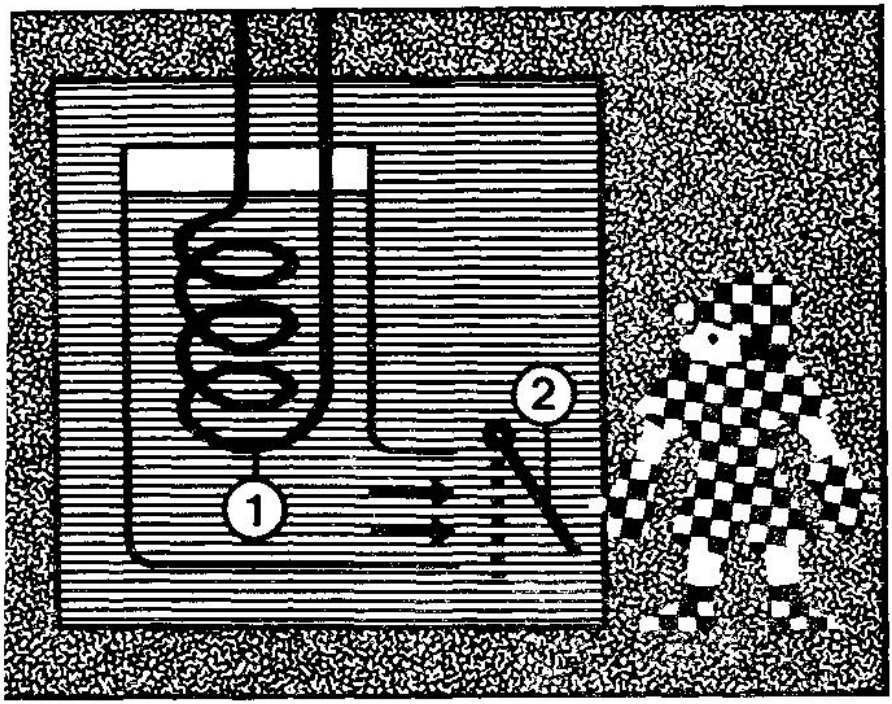
Поиски истины упорно продолжались…

В замкнутом сосуде, частично заполненном гелием II, установлен нагреватель. Этот сосуд имеет единственный выход в окружающий гелий II. За выходным отверстием сосуда расположен лепесток. При включении нагревателя возникает движение гелия II. Действительно, лепесток отклоняется, показывая, что жидкость на самом деле вытекает из сосуда. Самое поразительное заключается в том, что при этом уровень жидкости в сосуде не понижается. Можно проводить опыт как угодно долго, а лепесток все время будет отклонен. Как из сказочного рога изобилия, жидкость все время вытекает, а ее количество не изменяется.

После каждого последующего эксперимента поведение гелия II представлялось все более и более загадочным.

Нужно было тщательно проанализировать и теоретически осмыслить результаты экспериментальных исследований.

В то время теоретический отдел Института физических проблем возглавлял Лев Давидович Ландау.

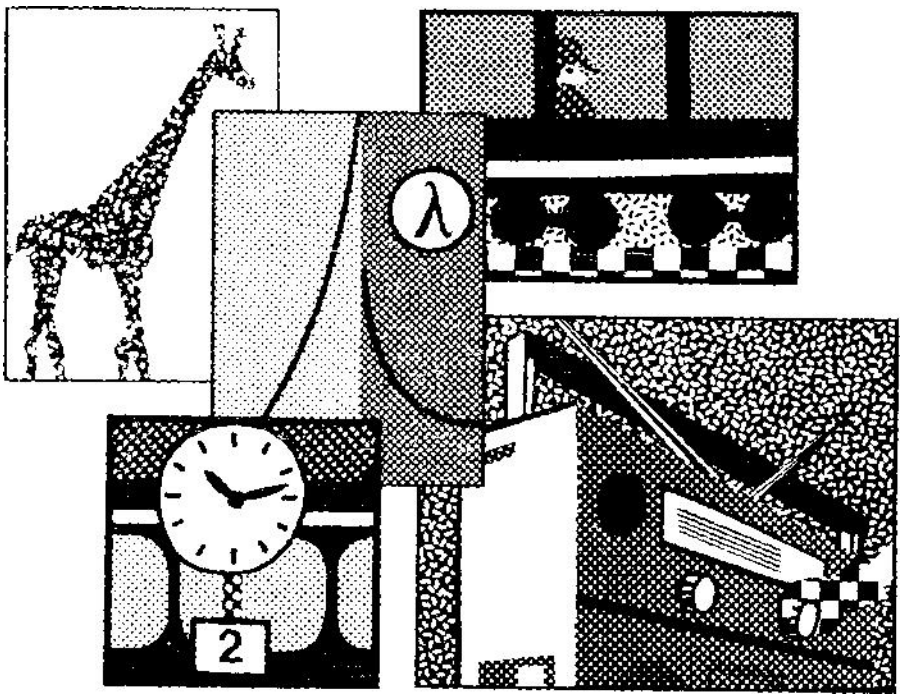


Рог изобилия, или еще один сюрприз жидкого гелия: I— нагреватель; 2— лепесток. Жидкость непрерывно вытекает из сосуда, а ее уровень в сосуде остается неизменным.

Это было счастливым стечением обстоятельств, что бок о бок работали два будущих лауреата Нобелевской премии: блестящий физик — экспериментатор, организатор науки П. Л. Капица и всемирно известный теоретик Л. Д. Ландау, связанные многолетним сотрудничеством и личной дружбой.

Капица открыл сверхтекучесть, Ландау создал теорию этого удивительного явления.

6. Арифметика на песке. Окно в мир квантовой механики. Удивительные законы мира невидимок. Путешествие в отцепленном вагоне. Тепло отделяется от материи. Еще одна загадка.



«В городском саду Баку крошечный мальчик пишет на дорожках длинный — предлинный ряд цифр, потом идет вдоль написанного и готовит ответ. Сразу видно, что занят он обыкновенным сложением и вычитанием, но для него это самая интересная игра. По цифрам на песке его находит мама, берет за руку и ведет домой.

Математику четыре с половиной года. Он очень хорош: глаза огромные, ясные, умные, приветливые. Зовут мальчика Лева, для мамы он Левенька…»[5].

Маленький математик — в будущем всемирно известный ученый — физик. Но об этом пока ничего неведомо его родителям: отцу — видному бакинскому инженеру — нефтянику Давиду Львовичу Ландау и матери — врачу Любови Вениаминовне. Они серьезно озабочены необычным поведением

своего младшего сына, совершенно несвойственным его возрасту. Самое большое для него удовольствие — уединиться в укромном месте и производить нескончаемые математические операции с числами.

В гимназии Ландау восхищает преподавателей своими успехами в точных науках. Но отметками по словесности он очень огорчает своих родителей.

Не следует, однако, думать, что, кроме мира чисел, для мальчика ничего не существует. Он увлекается произведениями Пушкина, Гоголя, Некрасова, а стихи и поэмы своего любимого поэта М. Ю. Лермонтова он знает наизусть…

Но вот Лева приносит свое сочинение по произведению А. С. Пушкина «Евгений Онегин», проверенное учителем. Написано оно хорошим слогом и ни одной орфографической ошибки. Подчеркнута карандашом лишь одна фраза: «Татьяна была довольно скучная особа». И… жирная единица.

— Неужели нельзя свое суждение иметь? — возмущается мальчик.

В 1921 году тринадцатилетний Ландау получил аттестат зрелости.

Что делать дальше? В таком возрасте в университет не примут… И один год Ландау учится в Бакинском экономическом техникуме. Самостоятельно изучает высшую математику. В тринадцать лет освоил дифференциальное исчисление, в четырнадцать лет — интегралы.

В 1922 году Ландау поступил в Бакинский университет, где учился сразу на двух факультетах: физико — математическом и химическом.

Великовозрастные студенты с удивлением взирали на своего малолетнего сокурсника:

— Мальчик, не ошибся ли ты адресом? Лучше ступай на двор, поиграй в бабки.

Но вскоре удивление сменяется восхищением, а покровительственный тон превращается в заискивающий.

К концу семестра студент Ландау первым блестяще сдает все зачеты. Он чуть ли не всему курсу помогает выполнять контрольные задания.

На лекциях по математике он не ведет конспекта. То, о чем рассказывает преподаватель, ему давно знакомо. Но не сидеть же без дела. И, отрешившись от окружающего мира, он исписывает формулами лист за листом, решая ведомую только ему проблему.

Наконец профессор обращает внимание на самого молодого студента, занятого, по всей видимости, «посторонним делом»…

— Ландау, к доске!.. Мой юный друг, очевидно, уже все

знает, — говорит профессор. — Так не потрудитесь ли вы решить следующую э… э… задачку.

Студент некоторое вермя неподвижно стоит у доски: надо собраться с мыслями. И когда терпение профессора начинает иссякать, юноша поднимается на цыпочки и начинает писать с левого верхнего угла доски.

Профессор скептически следит за ходом решения. Уж очень оно не вяжется с учебной программой.

Но вот поставлена последняя точка. Ответ в точности совпал с приведенным в задачнике.

Теперь в растерянности находится профессор. Он еще и еще раз внимательно изучает написанное на доске.

— Поздравляю вас, юноша, — наконец произносит профессор. — Вы нашли новое, оригинальное решение…

В 1924 году Ландау добивается перевода в Ленинградский университет.

Тогда Ленинград был научным центром России. Лидеры русской физики А. Ф. Иоффе, Д. С. Рождественский, Д. А. Рожанский и другие выдающиеся деятели науки готовили здесь молодых ученых для молодой Советской Республики.

В то время научный мир был взбудоражен каскадом открытий в физике, коренным образом преобразовавших эту науку. Закладывались основы современной ядерной физики, квантовой механики, физики твердого тела… Создавались предпосылки овладения атомной энергией.

Кипели страсти на семинарах и диспутах.

Студент Ландау стремился быть всюду, где решаются научные проблемы. Приходилось работать по четырнадцать — пятнадцать часов в сутки.

Студенческие работы Ландау посвящены принципиальным вопросам новой, волнующей умы ученых области физики — квантовой механике. В журнале «Zeitschrift fur Physik» публикуется его первая научная статья.

По окончании университета Ландау поступает в аспирантуру Ленинградского физико — технического института в группу теоретиков, руководимую Я. И. Френкелем.

В 1928 году в Москве состоялся VI съезд физиков. Старанием Иоффе этот съезд превратился в событие большого научного значения. Он собрал всех видных советских физиков. Среди иностранных участников съезда были: Нильс Бор — основоположник современной теории строения атома, один из создателей квантовой механики Поль Дирак и другие.

Съезд открылся в большой физической аудитории университета на Моховой докладом аспирантов Ленинградского

физико — технического института Л. Д. Ландау и Д. Д. Иваненко «Основы квантовой механики». Ландау сделал на съезде еще два доклада, вызвавших всеобщий интерес и оживленный обмен мнениями.

В конце 1929 года Ландау, как лучшего аспиранта, направляют в заграничную научную командировку.

Много соблазнов подстерегают молодого человека, впервые попавшего за границу. Но у Ландау на первом плане увлечение всей его жизни — наука.

В Берлине он встречается с творцом теории относительности Альбертом Эйнштейном. В Геттингене он участник семинара одного из светил мировой физики Макса Борна, а в Лейпциге он обсуждает проблемы квантовой механики с одним из ее основоположников Вернером Гейзенбергом.

Затем он едет в Копенгаген. Здесь его радушно встречает Нильс Бор.

— Хорошо, что вы приехали! Мы от вас многому научимся, — говорит маститый ученый, пожимая руку молодому советскому физику.

Легко представить себе, как был польщен таким приемом юный аспирант.

Правда, через несколько дней Ландау узнал, что Бор по доброте душевной так встречает каждого прибывшего к нему на семинар.

Участие в семинаре знаменитого датского физика сыграло громадную роль в формировании Ландау как теоретика. Этот семинар привлекал физиков- теоретиков всей Европы. В результате дискуссий здесь решались ключевые проблемы теоретической физики. Впоследствии Ландау не прекращал связи с Бором, который считал его своим лучшим учеником.

Далее Ландау держит путь к берегам туманного Альбиона. В знаменитой Кавендишской лаборатории он встречается со своим соотечественником Петром Капицей, прибывшим сюда на несколько лет раньше. Тогда Ландау не мог знать, что этот человек в дальнейшем сыграет немаловажную роль в его научной судьбе.

По возвращении на континент Ландау спешит в Цюрих. Он предвкушает радость общения с Вольфгангом Паули, чьи работы сыграли огромную роль в познании строения атомов.

Заграничная научная поездка Ландау длилась полтора года. Все это время он работал так же интенсивно, как у себя на родине. В этот период Ландау построил свою знаменитую теорию электронного диамагнетизма металлов, получившую мировое признание и вошедшую в физику под его именем.

Вскоре после возвращения в Ленинград Ландау переехал в Харьков. Здесь в Украинском физико — техническом институте он в 1932 году возглавил теоретическую группу.

С 1937 года до конца своей жизни (он скончался 1 апреля 1968 года) Ландау работал в Москве в Институте физических проблем Академии наук СССР, В 1946 году Ландау избирают действитель — ным членом Академии наук СССР. Трижды ему присуждалась Государственная премия, а за цикл книг по теоретической физике он был удостоен Ленинской премии (совместно с Е. М. Лившицем).

Советский академик, Герой Социалистического Труда Ландау был избран членом Лондонского королевского общества, членом Датской и Нидерландской академий наук, Национальной академии наук США, Американской академии наук и искусств.

Трудно назвать область современной физики, в которую Ландау не внес бы существенный вклад. Физика твердого тела и теория космических лучей, квантовая теория поля и физика ядра, физика элементарных частиц… Он опубликовал свыше 120 научных работ.

Благодаря его работам возник ряд новых научных направлений. Подобно цепной реакции, они вызвали сотни и тысячи теоретических и экспериментальных исследований.

Одной из наиболее значительных работ Ландау является

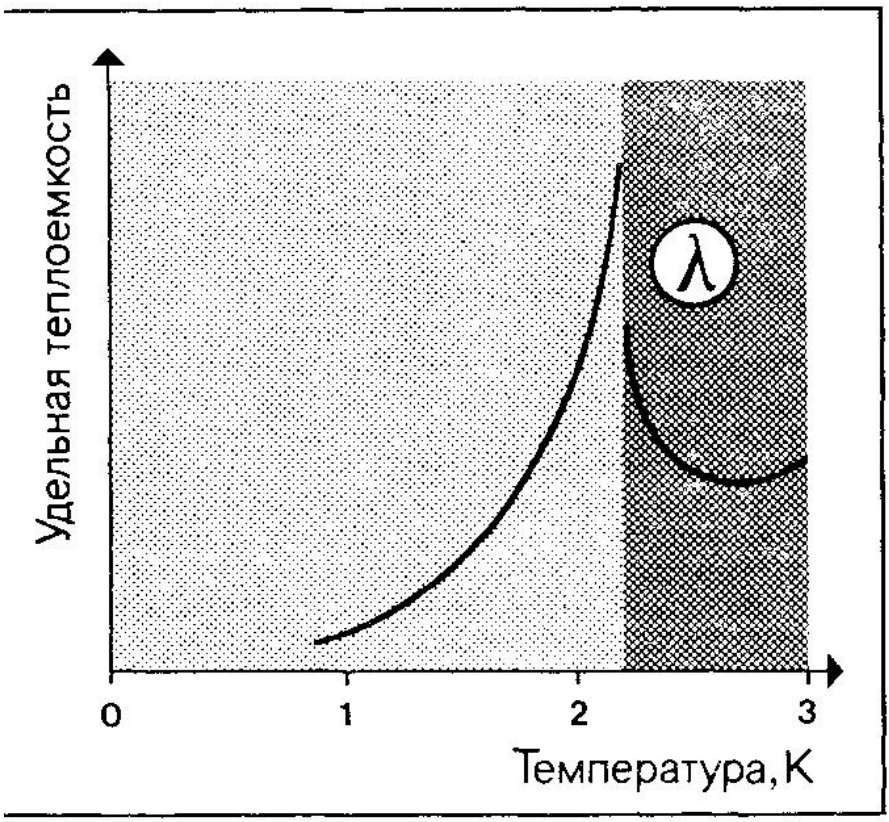
созданная им в 1941 году теория сверхтекучести гелия И.

Теория Ландау дала полную картину всех исследованных к тому времени свойств гелия II и подсказала ряд новых явлений.

Приступая к решению загадок «солнечного газа», Ландау начал с изучения кривой зависимости теплоемкости жидкого гелия от температуры, которую в течение трех десятилетий с удивлением созерцали многие исследователи разных стран.

Взглянем и мы с вами, читатель, на эту кривую. В окрестности перехода гелия I в гелий II она удивительно напоминает греческую букву лямбда.

Поэтому температуру перехода жидкого гелия из одного состояния в другое принято называть лямбда — точкой.



По обе стороны лямбда — точки. Скупые линии графика бесстрастно регистрируют поразительные изменения удельной теплоемкости жидкого гелия в лямбда — точке.

Вправо от этой точки гелий ведет себя как обычная классическая жидкость. Влево — он приобретает удивительное свойство, сверхтекучесть.

Переход вещества из одного состояния в другое — явление

далеко не новое в природе.

Простейший пример — вода, которая предстает перед нами в трех обличиях: в твердом состоянии — лед, в жидком — собственно вода и, наконец, в виде пара.

В науке такие превращения получили название фазовых переходов.

Повседневно наблюдаемые переходы, при которых происходит кипение, плавление или затвердевание вещества, сопровождаются поглощением или выделением теплоты. Это и есть та цена, которой приходится расплачиваться за перевод вещества из одного состояния в другое. При этом объем тела изменяется скачкообразно.

Однако переход гелия I в гелий II происходит без скрытой теплоты.

Такие переходы были известны и ранее, например, при резком изменении магнитных свойств вещества при определенной температуре. В отличие от обычных переходов, связанных со скрытой теплотой, они получили название фазовых переходов второго рода.

Ландау был первым физиком, детально исследовавшим природу фазовых переходов и создавшим теорию этих переходов.

Он показал, что при фазовых переходах второго рода действительно не должна выделяться скрытая теплота, а объем тела будет изменяться непрерывно. При этом должны скачкообразно изменяться вторичные термодинамические параметры: теплоемкость, сжимаемость и другие.

Экспериментальные данные измерений феноменального скачка теплоемкости и некоторых других параметров в точке перехода гелия I в гелий II блестяще подтвердили теоретические расчеты Ландау.

Так была разгадана первая загадка «солнечного газа»: преобразование гелия I в гелий II есть фазовый переход второго рода.

Теперь ученому предстояло, подобно герою старой сказки, разгадать еще ряд загадок возрастающей сложности.

— Удивительная метаморфоза гелия при температуре 2,2К, — рассуждал ученый, — не просто фазовый переход второго рода. Это качественно новое явление: классическая жидкость превращается в квантовую жидкость.

Что такое квантовая жидкость?

В микромире электронов, атомных ядер, атомов и молекул действуют свои закономерности, которые невозможно описать законами обычной (классической) механики, установленными на основании изучения движения тел большой массы.

В этом микромире целый ряд физических величин при определенных условиях могут принимать только дискретный (прерывистый) ряд значений, то есть они, как говорят физики, квантуются.

Отсюда и произошло название квантовой механики, возникшей в середине двадцатых годов новой отрасли теоретической физики, изучающей законы микромира.

Другой важный принцип квантовой механики заключается в так называемом соотношении неопределенностей, согласно которому чем точнее фиксировано положение частицы в пространстве, тем больше разброс ее скорости.

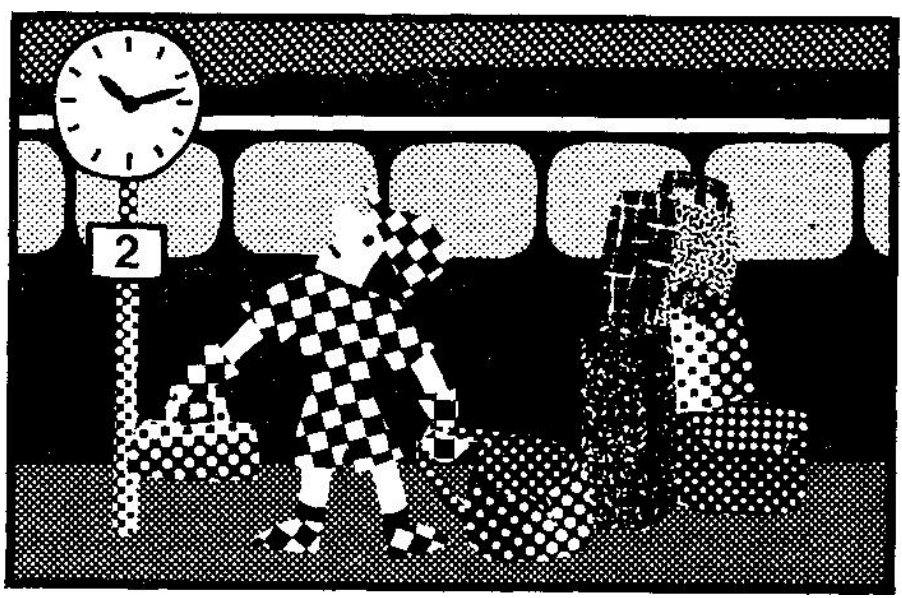
Можно представить себе, что произошло, если бы принцип неопределенности оказывал существенное влияние и на события, происходящие в окружающем нас макромире.

Предположим, что мы с вами находимся на железнодорожном вокзале.

«Поезд Москва — Ленинград отправляется в двадцать два часа пятнадцать минут со второй платформы», — объявляет диктор радиоузла.

Итак, положение «материальной частицы» в пространстве, в данном случае железнодорожного состава, определено точно. При этом условии в соответствии с принципом неопределенности никто не смог бы определить скорость поезда, а следовательно, время его прибытия на конечный пункт.

Более того, поезд вместо Ленинграда мог бы очутиться, например, в Кременчуге.



Впрочем, если поезд действительно опаздывает либо груз

засылается не по назначению (а такие случаи еще, к сожалению, наблюдаются), железнодорожникам не следует оправдываться ссылкой на квантовую механику.

Принцип неопределенности действует только в микромире, а тела «больших» масс, с которыми нам приходится встречаться в обыденной жизни, полностью подчиняются законам классической механики, которые человечество твердо усвоило еще во времена Ньютона.

Однако своенравные обитатели микромира не подчиняются твердому расписанию.

С понижением температуры постепенно «замерзают» все виды теплового движения частиц.

Наконец, при абсолютном нуле температуры всякое движение должно прекратиться и частицы должны находиться в абсолютном покое, каждая на своем месте. Следовательно, при абсолютном нуле температуры любое вещество должно было бы неминуемо перейти в твердое состояние.

Такую картину можно себе представить на основе законов классической физики. Однако, как мы уже знаем, именно в микромире действует принцип неопределенности.

Попытка локализировать частицу приводит к появлению у нее скорости. А это значит, что и при абсолютном нуле температуры частицы не могут оставаться в покое. Они совершают колебания, которые так и называются: нулевые колебания.

Амплитуда таких колебаний зависит от массы атомов и силы взаимодействия между ними. Чем меньше масса атомов и чем меньше сила взаимодействия между ними, тем больше амплитуда нулевых колебаний.

Если амплитуда нулевых колебаний превосходит или даже сравнима с межатомными расстояниями, то тела не могут затвердевать и должны оставаться жидкими вплоть до абсолютного нуля температуры.

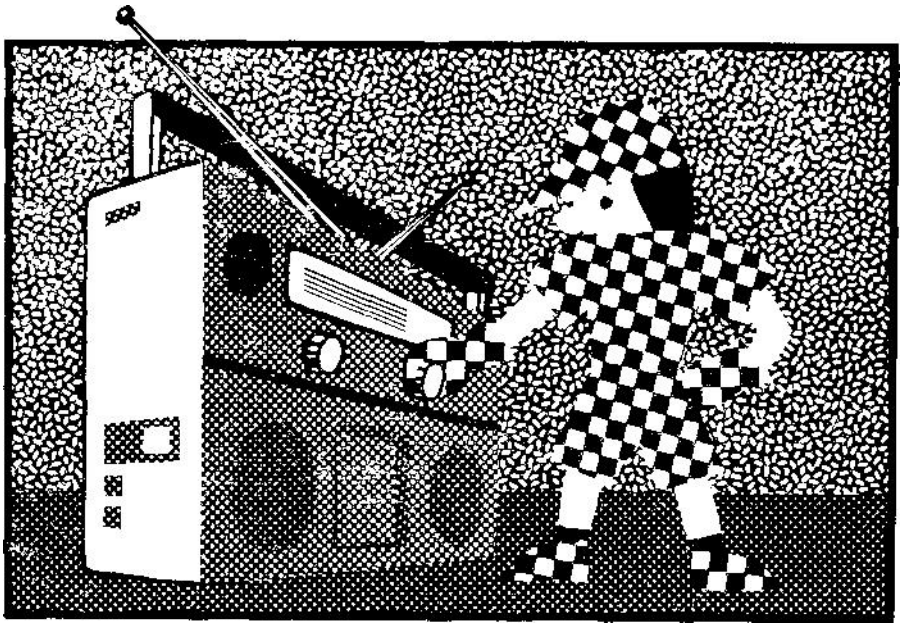
Большинство тел успевают затвердевать прежде, чем начинают проявляться квантовые закономерности.

Гелий является единственным веществом, которое при атмосферном давлении не затвердевает при сколь угодно низкой температуре. Он оставался бы жидким даже при абсолютном нуле температуры, так как у него амплитуда нулевых колебаний достаточно велика.

Жидкий гелий может перейти в твердое состояние только при повышении давления до 25 атмосфер.

…Посторонние шумы, или, как их называют, помехи, врывающиеся подчас в репродуктор вашего приемника, мешают

слушать передачу. Если приемник достаточно чувствителен, то, чуть — чуть повернув ручку, вы можете отстроиться от помех.



Тепловые колебания можно уподобить таким помехам.

По мере охлаждения жидкости интенсивность тепловых колебаний уменьшается. Уже сравнительно недалеко до абсолютного нуля температуры. Но, увы, жидкость превращается в твердое тело прежде, чем тепловые колебания успевают затухнуть в достаточной степени.

Гелий оказался исключением. При его охлаждении до достаточно низкой температуры удается «отстроиться» от тепловых помех.

Гелий является квантовой жидкостью, его свойства можно объяснить на основании законов квантовой механики.

Здесь уместно вспомнить, что камеру Вильсона, с помощью которой удалось впервые воочию наблюдать траекторию микрочастиц, физики назвали «окном в атомный мир».

По аналогии гелий II можно назвать «окном в мир квантовой механики», созданным самой природой.

Ландау был первым физиком, заглянувшим в это окно.

Мы уже говорили о том, что амплитуда нулевых колебаний атомов гелия сопоставима с межатомными расстояниями. Следовательно, в этом случае нет смысла говорить об отдельных атомах, а нужно рассматривать гелий II как единую систему взаимодействующих частиц.

Из квантовой механики известно, что такая система может поглощать и отдавать энергию только определенными порциями

— квантами.

По мысли Ландау, такие поглощенные телом кванты ведут себя как особые частицы, движущиеся в объеме тела. Они получили название — квазичастицы (дословный перевод этого слова: «почти частицы»).

Не вдаваясь в подробности, заметим, что количество квазичастиц в теле тем больше, чем больше энергия тела, или, что то же самое, чем выше его температура.

Такое положение сохраняется при достаточно низких температурах, пока число квазичастиц невелико и их можно рассматривать как газ.

В обычных жидкостях происходит все иначе: они затвердевают задолго до того, как их возбуждения могут быть описаны с помощью газа квазичастиц.

Из теории Ландау следует, что вплоть до определенной скорости движения в сверхтекучем гелии II не могут образовываться новые квазичастицы, а следовательно, не может изменяться его энергия. Поэтому до достижения этой скорости гелий II должен течь как идеальная, невязкая, то есть сверхтекучая жидкость.

Произведя критический анализ экспериментальных данных, Ландау пришел к совершенно парадоксальному на первый взгляд выводу.

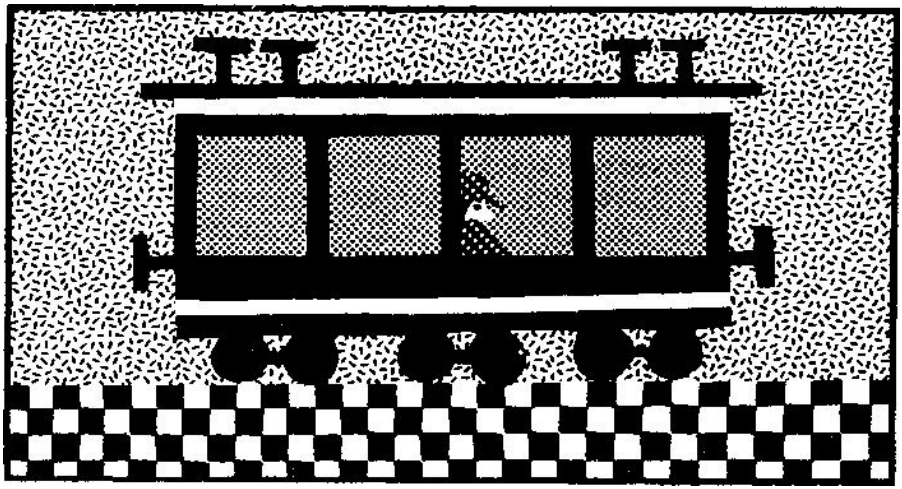
Гелий II мыслится как совокупность двух жидкостей, которые могут двигаться независимо. Словно привидение в старинном замке, они проходят одна через другую, не испытывая при этом никакого трения.

Читатель, разумеется, должен иметь в виду, что такая «двухжидкостная модель» гелия II является лишь удобным способом описания происходящих в нем явлений. Можно также сказать, что гелий II — это одна жидкость, которая способна совершать два движения одновременно.

— Час от часу не легче! — может воскликнуть в этом месте наш читатель.

Как это так — совершать сразу два движения: одновременно двигаться и оставаться на месте?

Такое могло произойти разве только с человеком рассеянным с улицы Бассейной — героем известного стихотворения С. Маршака. Вскочив в отцепленный вагон, он воображал, что путешествует, на самом деле не сдвинувшись с места.



Выходит, что в этом удивительном микромире можно двигаться, оставаясь в «отцепленном вагоне».

Впрочем, не следует забывать, что наши наглядные представления являются отражением того, с чем мы сталкиваемся в обыденной жизни, а квантовые явления имеют место в недоступном нашему непосредственному восприятию микромире. Поэтому здесь возможна лишь грубая аналогия.

Каждое из двух происходящих в гелии II движений сопровождается переносом определенной массы жидкости, причем сумма этих масс равна истинной массе жидкости. В этом смысле можно говорить о двух составляющих (компонентах) гелия II. Вместе с тем надо твердо усвоить, что никакого разделения атомов гелия на две категории нет.

Каждое из двух движений является коллективным свойством большого количества одних и тех же атомов жидкости.

Обе компоненты резко отличаются друг от друга своими свойствами. Одна из них не обладает вязкостью.

Ландау назвал ее сверхтекучей.

Вторая компонента, называемая нормальной, представляет собой газ квазичастиц. Квазичастицы при движении взаимодействуют между собой и со стенками сосуда.

Следовательно, нормальная компонента обладает вязкостью. Она ведет себя как обыкновенная жидкость.

Другое, не менее важное различие заключается в том, что только нормальная компонента при своем движении переносит тепло.

В самом деле, единственными носителями тепловой энергии в гелии II являются квазичастицы. Что касается сверхтекучего движения, то оно по своей природе не связано с переносом тепла.

Таким образом, в гелии II тепло как бы приобретает самостоятельное существование, отрываясь от остальной массы

жидкости.

При понижении температуры уменьшается количество квазичастиц, содержащихся в жидкости, а следовательно, увеличивается доля сверхтекучей компоненты, и при температуре абсолютного нуля весь гелий II должен перейти в сверхтекучее состояние.

С повышением температуры количество квазичастиц возрастает, и вместе с тем увеличивается масса, связанная с нормальным движением. Наконец, при некоторой температуре эта масса сравнивается с массой жидкости. При этом сверхтекучее движение исчезает, и гелий II переходит в гелий I, который ведет себя как обычная жидкость.

Эта теория Ландау объяснила удивительное поведение квантовой жидкости гелия II.

В 1962 году Ландау была присуждена Нобелевская премия по физике «За пионерские теории конденсированных сред, особенно жидкого гелия».

Любую теорию только после убедительных доказательств можно считать достоверной. Недаром Ландау любил повторять:

«Верховным судьей всякой физической теории является опыт».

В 1944 году в Институт физических проблем для подготовки к защите докторской диссертации прибыл грузинский физик Элевтер Луарсабович Андроникашвили.

Молодой ученый обладал незаурядными способностями экспериментатора. Проведенный им эксперимент с «двухжидкостным» гелием стал ныне классическим.

Сущность опыта Э. Л. Андроникашвили заключается в следующем. Представьте себе цилиндрический сосуд с гелием II, вращающийся так медленно, что жидкость увлекается стенкой сосуда. При этом должна прийти в движение только нормальная компонента гелия II, а его сверхтекучая компонента остается неподвижной.

Андроникашвили заменил вращение сосуда крутильными колебаниями стопки параллельных металлических дисков, погруженной в гелий II. Такой метод позволил значительно увеличить площадь соприкосновения вращающегося тела и жидкости.

Стопка содержала 100 дисков из алюминиевой фольги толщиной десять микрометров каждый. Расстояние между соседними дисками составляло 0,02 миллиметра.

При вращении стопки сверхтекучая компонента легко проходила между дисками, а нормальная компонента, увлекаемая дисками, участвовала во вращении.

Эксперимент проводился в температурном диапазоне от точки перехода гелия I в гелий II до 1,3К.

С понижением температуры уменьшалась масса нормальной компоненты, а следовательно, уменьшался период крутильных колебаний стопки.

Измеряя периоды крутильных колебаний, экспериментатор определил отношение масс нормальной и сверхтекучей компонент для каждого значения температуры.

Так двухжидкостная модель гелия II получила убедительное экспериментальное подтверждение.

Ознакомившись, правда, в самых общих чертах, с теорией Ландау, читатель может попытаться сам найти объяснение результатов экспериментов, описанных в предыдущей главе.

При опыте с узкой щелью вязкость гелия II не обнаруживается, поскольку сверхтекучая компонента весьма быстро вытекает через щель без трения.

Нормальная же компонента, обладающая вязкостью, медленно просачивается. Что касается измерений с помощью колеблющегося диска, то они приводят к отличной от нуля вязкости, так как диск движется в жидкости, содержащей обе компоненты. Затухание его колебаний происходит из-за взаимодействия с нормальной компонентой.

В эксперименте с узкой щелью действует сверхтекучая компонента, а в опыте с диском — нормальная.

Теперь не вызовет удивления читателя, что при истечении из сосуда с узкой щелью гелия II температура жидкости в сосуде повышается, а вытекший гелий охлаждается. Поскольку через узкую щель вытекает сверхтекучая компонента, которая тепло не переносит, все тепло остается в сосуде.

Так как это тепло уже относится к меньшему количеству жидкости, то естественно, что температура жидкости повышается.

В экспериментах Капицы вытекшая из сосуда жидкость охладилась на 0,2–0,4К. Это достаточно большая величина, если учесть, что весь температурный диапазон существования гелия II составляет немногим более 2К.

Чем объясняется «сверхтеплопроводность» гелия II?

Если в сосуде с гелием II между какими-либо двумя точками жидкости имеется разность температур, то в нем возникают внутренние движения нормальной и сверхтекучей компонент «друг через друга» без трения.

Несущая при механическом движении тепло нормальная компонента приводит к аномально большой теплопроводности гелия II.

Почему же в следующем опыте Капицы уровень жидкости в

замкнутом сосуде остается все время постоянным, несмотря на то что из него непрерывно вытекает жидкость?

Легко понять, что под действием тепла из сосуда вытекает только нормальная компонента, которая и вызывает отклонение лепестка. В обратном направлении возникает движение сверхтекучей компоненты.

Скорость сверхтекучего движения устанавливается такой, чтобы суммарного переноса массы не было. На перенос же тепла сверхтекучее движение влияния не оказывает, так как оно вообще тепла не переносит.

Наконец о самом интригующем эксперименте, описанном в начале предыдущей главы.

«Таинственный» переход гелия II из внутреннего сосуда во внешний объясняется следующим образом.

Стенки сосуда в той их части, которая расположена выше уровня жидкости, покрываются очень тонкой (толщиной порядка одной миллионной доли сантиметра) пленкой жидкости. Это происходит потому, что молекулы жидкости притягиваются к поверхности твердых тел.

В обычных жидкостях наличие такой пленки практически не проявляется, так как столь тонкая пленка может из-за большой вязкости двигаться лишь с ничтожной скоростью.

Однако сверхтекучий гелий II способен протекать по пленке с большой скоростью, что приводит к быстрому выравниванию уровней.

После того как в 1941 году был получен ответ на вопрос «что такое сверхтекучесть?», казалось, что наконец стала ясной и природа сверхпроводимости.

Предполагалось, что свободные электроны в металле можно рассматривать как электронную жидкость, а исчезновение сопротивления — как потерю вязкости электронной жидкостью.

Но последующие эксперименты с жидким гелием заставили усомниться в этом предположении.

Природный гелий состоит из двух устойчивых изотопов: гелия 4 и гелия 3.

Напомним читателю, что изотопами называют разновидности одного и того же химического элемента, отличающиеся массами атомов.

Изотопы имеют одинаковое число электронов в атомной оболочке и занимают одно и то же место в Периодической системе элементов Менделеева. Отсюда и их название — от греческих слов «изо» — «одинаковый» и «топос» — «место».

До сих пор наш рассказ относился к гелию 4.

В природном гелии содержится гелия 3 примерно в десять

миллионов раз меньше, чем гелия 4. Поэтому можно с полным основанием сказать, что гелий 3 является наиредчайшим среди наиболее редких веществ, встречающихся в природе.

В начале нынешнего века получение чистого гелия представляло нелегкую задачу.

Техника сегодняшнего дня обеспечивает исследователей нужным количеством его редчайшего изотопа — гелия 3, который получают искусственным путем при ядерных реакциях в результате радиоактивного распада одного из изотопов водорода — трития.

Гелий 3 является квантовой жидкостью, по некоторым своим свойствам отличающейся от гелия 4. В частности, температура кипения жидкого гелия 3 составляет 3,2К, а не 4,2К, как у гелия 4.

Таким образом, говоря о жидком гелии, мы подразумеваем не одну, а две различные квантовые жидкости.

Так вот, гелий 3 не удавалось перевести в сверхтекучее состояние даже при охлаждении до температуры, оцениваемой в десятые доли кельвина выше абсолютного нуля.

Исследователи вспомнили, что в квантовой механике различают два типа квантовых жидкостей. К какому из них относится жидкость, зависит от особой характеристики частиц, называемой спином, из которых она состоит.

Из-за сложности этого понятия трудно, в рамках нашего рассказа, объяснить, что такое спин.

Вместо этого приведем качественное правило, которое позволяет определить тип квантовой жидкости.

Известно, что каждая жидкость состоит из отдельных частиц. Так жидкий гелий состоит из атомов гелия, жидкий водород — из молекул водорода, и т. п.

Каждая частица жидкости в свою очередь состоит из так называемых элементарных частиц: электронов, протонов, нейтронов.

Свойство сверхтекучести тесно связано с четностью числа элементарных частиц в каждой частице жидкости.

В системах, которые состоят, например, из атомов, содержащих четное число элементарных частиц, может возникнуть состояние сверхтекучести.

Итак, в природе имеются два типа квантовых жидкостей — обладающие свойством сверхтекучести и не обладающие этим свойством. Первые получили название Бозе — жидкости, вторые Ферми- жидкости, в честь физиков, которые первыми описали их свойства.

Атом гелия 4 состоит из ядра, содержащего два протона и два нейтрона, и двух электронов, а значит, имеет четное количество

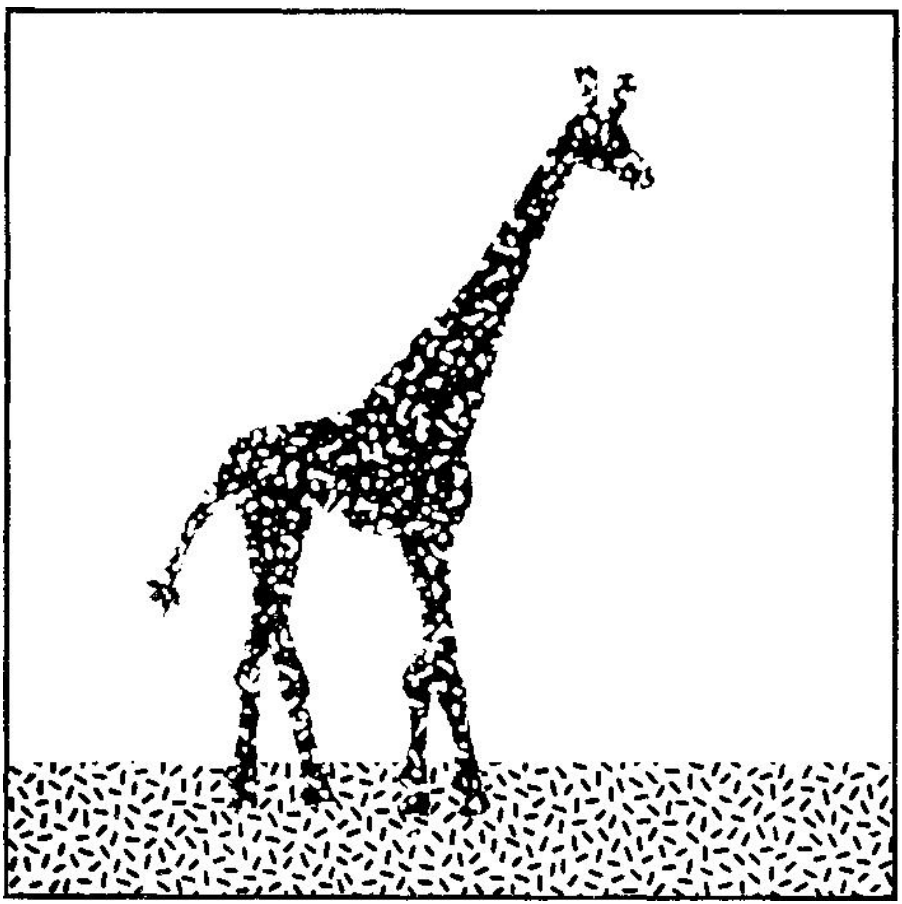
частиц.

Атом гелия 3 состоит из ядра, содержащего два протона и один нейтрон, и двух электронов. Следовательно, он имеет нечетное число частиц.

Будто все стало на свое место: в соответствии с теорией гелий 4 обладает сверхтекучестью, а ге — лию 3 это свойство не присуще. Такое утверждение можно было встретить в монографиях по сверхтекучести, опубликованных еще сравнительно недавно.

А как обстоит дело с электронной жидкостью?

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что электроны в металле ведут себя как ферми — частицы.



Казалось, что такие частицы, как электроны, которые, как бы чувствуя взаимную антипатию, обладают свойством отталкиваться друг от друга, не могут ни при каких условиях образовать соединение, состоящее из четного числа частиц.

Значит ли это, что электронная жидкость не способна перейти в сверхтекучее состояние, а следовательно, металлы не

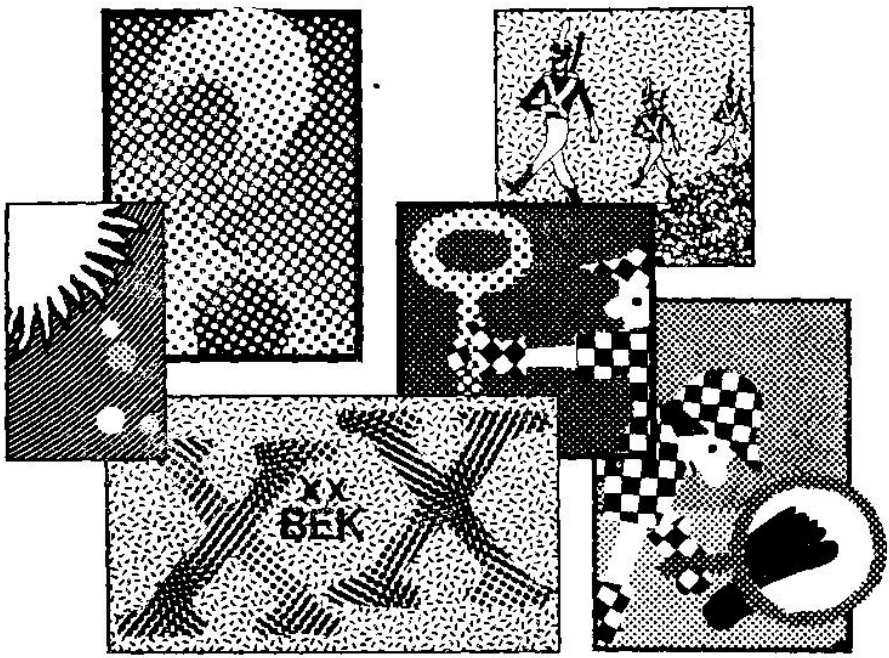
должны обладать свойством сверхпроводимости?

Физики — теоретики продолжали усиленно работать над проблемой природы сверхпроводимости.

Никто не хотел очутиться в положении ребенка, который, впервые увидев в зоологическом саду жирафа, воскликнул:

— Этого не может быть!

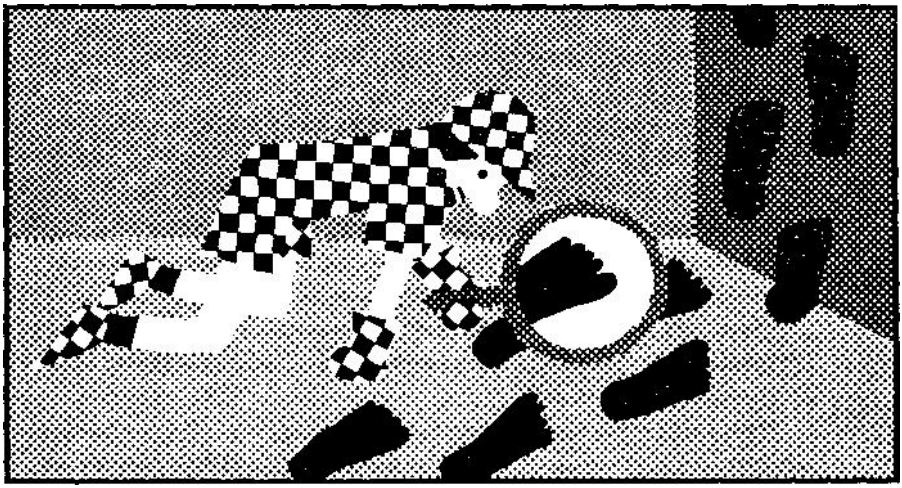
7. История с почти детективным началом. Загадка века. Ионы и электроны. Невидимка находит напарника. Строем сквозь кристалл. Вопросы без ответа.



Многие занимательные детективные истории начинаются с… исчезновения. Поиски пропажи, будь это человек, документ или драгоценный камень, служат основой остросюжетного повествования.

На этот раз речь идет о необычной пропаже. Как читатель уже знает, исчезло электрическое сопротивление.

Приступая к следствию по такому необыкновен — ному делу, мы должны прежде всего уяснить себе, что такое электрическое сопротивление вообще.



Напомним, что металл представляет собой сложную систему, состоящую из положительных ионов, то есть атомов, потерявших один или несколько электронов, и электронов, находящихся в свободном состоянии. Эти свободные электроны, или, как их называют, электроны проводимости, и являются носителями электрического тока.

В идеальном кристалле ионы расположены в строгом порядке, каждый на своем месте. Они находятся в узлах пространственной решетки, так называемой кристаллической решетки.

Для того чтобы представить себе размеры этого микромира, достаточно сказать, что для измерения расстояния между соседними ионами, самая маленькая мера длины, применяемая в технике, — микрометр, равная, как вытекает из ее названия, одной миллионной доли метра, оказалась слишком большой. Расстояние между ионами в кристаллической решетке измеряется в нанометрах (один нанометр равен одной миллиардной доли метра).

Напомним еще раз, что поведение «невидимок» (микрочастиц) подчиняется особым квантовым законам.

В идеальном кристалле электрон ведет себя как волна. Он свободно проходит сквозь кристаллическую решетку, подобно тому как световая волна распространяется в прозрачной среде.

Поэтому в идеальном кристалле сопротивление электрическому току отсутствует.

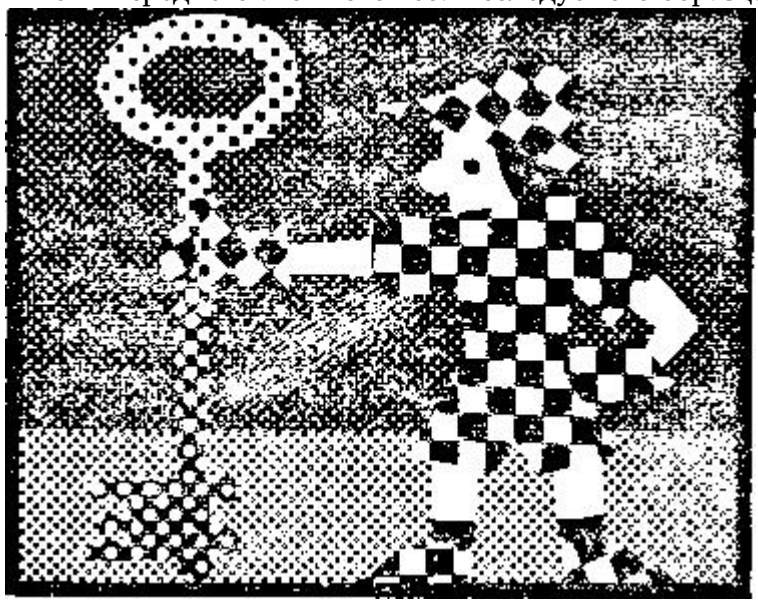
При температуре выше абсолютного куля ионы совершают тепловые колебания. Порядок в кристалле нарушается.

Такая среда перестает быть прозрачной для электронов. Происходит, как говорят физики, рассеивание электронов, подобно тому как морская волна рассеивается, встретив препятствие. Электроны рассеиваются также на атомах примесей,

хаотично расположенных в кристалле.

Возникает сопротивление прохождению электрического тока, или, короче, электрическое сопротивление.

Но вот в 1950 году при исследовании сверхпроводимости ртути оказалось, что критическая температура образцов ртути зависит от их изотопного состава. Она возрастает при уменьшении среднего атомного веса исследуемого образца.



Это явление, обнаруженное впоследствии также на олове, галлие и некоторых других сверхпроводящих элементах, получило название изотопического эффекта.

Изотопический эффект — чудесный ключ, с помощью которого ученые получили воз можность открыть дверь в замечательный мир сверхпроводимости.

Известно, что масса ионов кристаллической решетки в тысячи раз больше массы свободных электронов.

Поэтому масса изотопа является характеристикой кристаллической решетки и главным образом влияет на ее свойства.

После открытия изотопического эффекта стало ясно, что сверхпроводимость, которая вообще является свойством системы электронов, каким-то образом связана с состоянием кристаллической решетки.

А значит, и возникновение эффекта сверхпроводимости обусловлено взаимодействием электронов с решеткой кристалла. Это взаимодействие ответственно за появление электрического сопротивления, а при определенных условиях оно должно привести к отсутствию электрического сопротивления, то есть к

сверхпроводимости.

Прошло всего несколько лет после открытия изотопического эффекта, и в 1957 году американские исследователи Дж. Бардин, Л. Н. Купер и Дж. Р. Шриффер (этот триумвират принято сокращенно называть БКШ — по первым буквам их фамилий) и советский ученый Николай Николаевич Боголюбов создали теорию, объясняющую явления, происходящие в мире сверхпроводимости.

На «живом серебре» (такое образное название носит ртуть на украинском и немецком языках) была впервые открыта сверхпроводимость. Именно на ртути был обнаружен изотопический эффект, создавший важную предпосылку для разработки современной теории сверхпроводимости.

На страницах этой книги мы лишены возможности пользоваться сложными математическими уравнениями, описывающими законы квантовой механики. Поэтому дается лишь упрощенное представление о природе сверхпроводимости.

В обычном проводнике каждый электрон ведет себя как индивидуалист. Между электронами проводимости отсутствует, образно говоря, чувство локтя. Более того, по закону Кулона электрон отталкивает соседа.

В сверхпроводниках происходит объединение электронов в пары. Участники таких пар притягиваются друг к другу.

У читателя, твердо усвоившего из элементарного курса физики, что между электронами существуют кулоновские силы отталкивания, это последнее утверждение не может не вызвать недоумения.

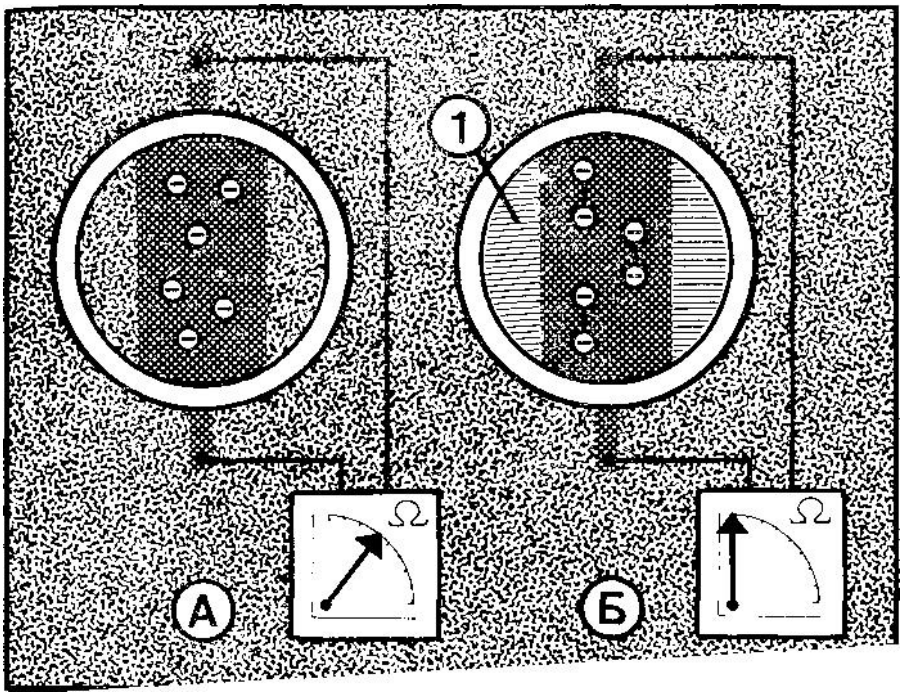
Но возможность электронов при определенных условиях притягиваться друг к другу не противоречит законам физики.

Свободный электрон, двигаясь через кристаллическую решетку, притягивает к себе положительные ионы металла, вызывая тем самым деформацию решетки. Это приводит к появлению в решетке области избыточного положительного заряда, образующейся благодаря высокой плотности ионов там, где решетка деформировалась.

Второй электрон притягивается избытком положительного заряда и тем самым косвенно взаимодействует с первым электроном (то есть притягивается к нему).

При достаточно низких температурах у ряда металлов такое притяжение преобладает над кулоновским отталкиванием. Тогда электроны могут объединяться попарно.

Такие пары электронов получили название куперовских пар, по имени Л. Купера, одного из создателей теории сверхпроводимости.



Невидимка находит напарника. I — жидкий гелий. А — в обычном проводнике электроны перемещаются в одиночку, каждый из них отталкивает соседа. Б — в сверхпроводнике электроны объединяются в пары. Строй куперовских пар свободно перемещается по кристаллу. Электрическое сопротивление равно нулю.

Казалось, электрону легче всего выбрать себе напарника из ближайших соседей. Но это не так. Напарник электрона должен находиться от него на относительно большом расстоянии, с тем чтобы ку- лоновская сила отталкивания была достаточно мала.

Электроны куперовской пары находятся друг от друга на расстоянии один микрометр. В обыденной жизни это, разумеется, мизерная величина. Но не забывайте, что мы с вами сейчас находимся в микромире, где счет идет на доли нанометра.

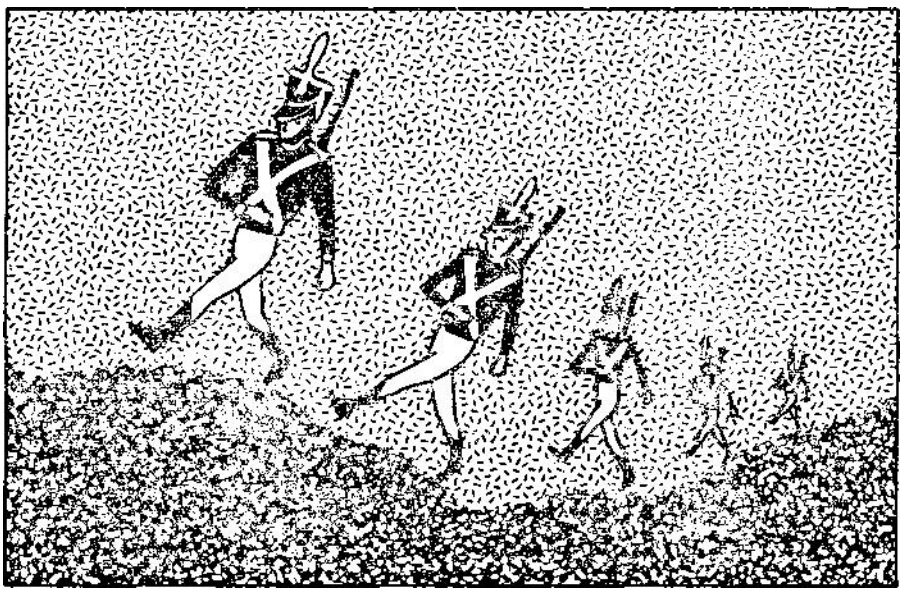
Электрон должен «чувствовать» своего напарника, находящегося от него на расстоянии, в десятки тысяч раз превышающем расстояние до его ближайшего соседа.

Если мы мысленно построим шар радиусом в один микрометр, в центре которого один из электронов куперовской пары, то его партнер должен находиться где-то на поверхности шара. Между тем внутри этого шара находятся мириады электронов.

Каким-то удивительным для нас, жителей макромира,

способом электрон в таких условиях выбирает себе напарника. И не ошибается в своем выборе! Расчеты показывают, что образование сформированных таким образом куперозских пар энергетически наиболее выгодно.

Спаривание двух электронов возникает только тогда, когда большое число других электронов находится в этом же состоянии.



Такой коллектив электронов в кристалле можно уподобить строю солдат, совершающих марш по местности, пересеченной завалами и рытвинами. Здесь каждый подстраховывает своего товарища, не давая ему оступиться или попасть в яму.

Точно так же «строй» куперовских пар легко «марширует» по сверхпроводнику. Электрическое сопротивление исчезает.

Однако с ростом температуры интенсивность тепловых колебаний увеличивается, и при температуре выше критической куперовские пары распадаются. Сверхпроводник превращается в обычный проводник.

В сверхпроводнике, при температуре отличной от абсолютного нуля, не все электроны объединяются в куперовские пары. Наряду со спаренными электронами там имеются и обычные электроны, которые могут рассеиваться и испытывать сопротивление так же, как электроны проводимости в нормальном кристалле.

Количество куперовских пар уменьшается при повышении температуры и приближении ее к критической. Наоборот, при абсолютном нуле все электроны должны образовать пары.

Из рассказанного в предыдущей главе читатель уже знает, что электроны проводимости в металле ведут себя как Ферми —

жидкость.

Электронная жидкость движется под действием электрического поля в кристаллической решетке, как обычная жидкость по трубопроводу под действием перепада давления. Взаимодействуя с кристаллической решеткой и всевозможными примесями, электроны рассеиваются, испытывая сопротивление движению.

«Трение» электронной жидкости о кристалл, то есть ее «вязкость», мы наблюдаем как сопротивление электрическому току.

Исчезновение сопротивления в сверхпроводнике можно трактовать как исчезновение вязкости элек тронной жидкости. Таким образом, сверхпроводимость можно рассматривать как сверхтекучесть электронной жидкости. Сверхпроводимость, как мы уже знаем, осуществляется благодаря спариванию электронов. Иными словами, в момент перехода в сверхпроводящее состояние Ферми — жидкость переходит в Бозе — жидкость.

Так как при переходе в сверхпроводящее состояние не все электроны спариваются, мы можем представить себе сверхпроводник как бы пропитанным двумя электронными жидкостями. Одна из них, состоящая из нормальных электронов, обладает свойством обычной жидкости, другая, состоящая из куперовских пар, — сверхтекуча.

В сверхпроводнике ток может переноситься как нормальными, так и спаренными электронами.

Постоянный ток весь переносится куперовскими парами. В этом случае сверхпроводящий металл подобен двум параллельным проводникам: один из которых с нормальным сопротивлением, другой с сопротивлением равным нулю; причем проводник с нулевым сопротивлением шунтирует проводник с нормальным сопротивлением, а следовательно, общее сопротивление равно нулю.

Если ток переменный, то часть тока в сверхпроводнике может переноситься нормальными электронами. Однако при относительно небольших частотах эта часть невелика.

Читателя, наверное, интересует судьба и другой Ферми — жидкости — гелия 3.

После того как стал ясным механизм спаривания электронов в металле, напрашивалась мысль, что похожий процесс может произойти и в гелии 3.

Расчеты показали, что при достаточно сильном охлаждении здесь неминуемо должны спариваться атомы гелия.

Штурм абсолютного нуля продолжался.

Наконец в 1972 году при температуре 0,00265К гелий 3 был

получен в сверхпроводящем состоянии.

Завершая рассказ о гелии 3, уместно остановиться еще на одном интересном свойстве этой квантовой жидкости.

Оказывается, гелий 3 сохраняет конечную растворимость (около 6 %) в жидком гелии 4 вплоть до абсолютного нуля температуры.

Возникла идея использовать это свойство для того, чтобы заставить гелий 3 и гелий 4 «работать» совместно.

Действительно, при соприкосновении почти чистого жидкого гелия 3 с разбавленным раствором гелия 3 в гелии 4 атомы гелия 3 должны перейти в раствор. При этом поглощается теплота растворения, и температура раствора понижается.

Растворение осуществляется в одной части прибора — в камере растворения, а удаление атомов гелия 3 из раствора путем откачки в камере испарения.

Непрерывная циркуляция гелия 3 осуществляется системой насосов и теплообменников. При этом в камере растворения можно неограниченно долго поддерживать температуру 10–20 милликельвинов.

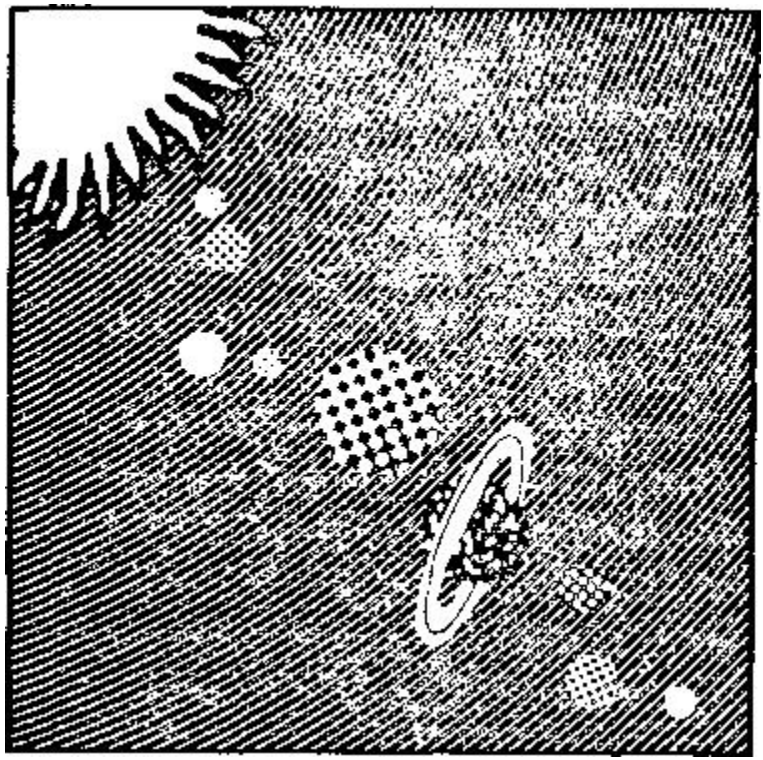
Другими способами можно достигнуть и еще более низких температур — в миллиардные доли кельвина.

Современная теория сверхпроводимости позволяет объяснить ряд явлений, долгое время считавшихся загадочными.

Стало ясным, например, почему различные аллотропические модификации одного и того же металла, отличающиеся друг от друга различной структурой кристаллической решетки, имеют разные критические температуры перехода в сверхпроводящее состояние.

Кристаллическая решетка, как читатель уже знает, играет важную роль в процессе сверхпроводимости.

Для того чтобы понять суть другого удивительного явления — квантования магнитного потока в сверхпроводящем контуре, — уместно привести следующую аналогию.



В 1911 году Резерфорд предложил планетарную модель атома, согласно которой в центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся электроны, подобно планетам вокруг Солнца. Движущиеся с центростремительным ускорением электроны должны непрерывно излучать электромагнитную энергию. В соответствии с законами классической физики они должны были потерять всю свою энергию и упасть на ядро. Между тем давно известно, что атом представляет собой устойчивую систему частиц.

Разрешить это противоречие удалось в 1913 году датскому физику Нильсу Бору, заложившему основы современной квантовой теории атома.

Согласно постулатам Бора, энергия электрона в атоме и ряд других величин не могут изменяться непрерывно. Допустимы только определенные значения физических величин, а следовательно, только определенные орбиты. Двигаясь вокруг ядра по своим «разрешенным» орбитам, электроны не излучают электромагнитные волны.

Представьте себе сверхпроводящее кольцо, по которому течет ток. Электроны в сверхпроводящем кольце как бы движутся по гигантским боровским орбитам. Поэтому к их движению применимы правила квантования Бора.

Сверхпроводящий ток создает вне сверхпроводника

магнитное поле, а следовательно, и магнитный поток (вспомните, так называют произведение индукции магнитного поля на величину площади, охватываемой контуром). Оказывается, что эта величина может принимать только дискретный (прерывистый) ряд значений. Иными словами, магнитный поток квантуется.

Если при изучении свойств атома мы сталкиваемся с квантованием в микромире, которое мы не в состоянии непосредственно наблюдать, то сверхпроводимость дает нам пример квантования макроскопической величины — потока магнитного поля.

Здесь мы наблюдаем квантовый эффект, гигантский по своим масштабам.

Теоретически и экспериментально установлено, что величина минимальной порции — кванта магнитного потока — составляет две десятимиллионные доли гаусса[6] на квадратный сантиметр.

Эффект квантования магнитного потока послужил прекрасной основой для создания приборов, измеряющих электрические и магнитные величины с немыслимой ранее точностью.

Может ли современная теория сверхпроводимости дать исчерпывающее объяснение всех явлений, происходящих в этом удивительном мире?

Исследователи пока не могут теоретически рассчитать критическую температуру конкретных металлов и с полной достоверностью ответить на вопрос, способен ли тот или иной металл стать сверхпроводником. Осталось немало и других нерешенных проблем.

Напомним читателю, что явление сверхпроводимости впервые наблюдалось в 1911 году. Но только в 1957 году, спустя почти полвека, наука смогла дать ответ на вопрос, что такое сверхпроводимость.

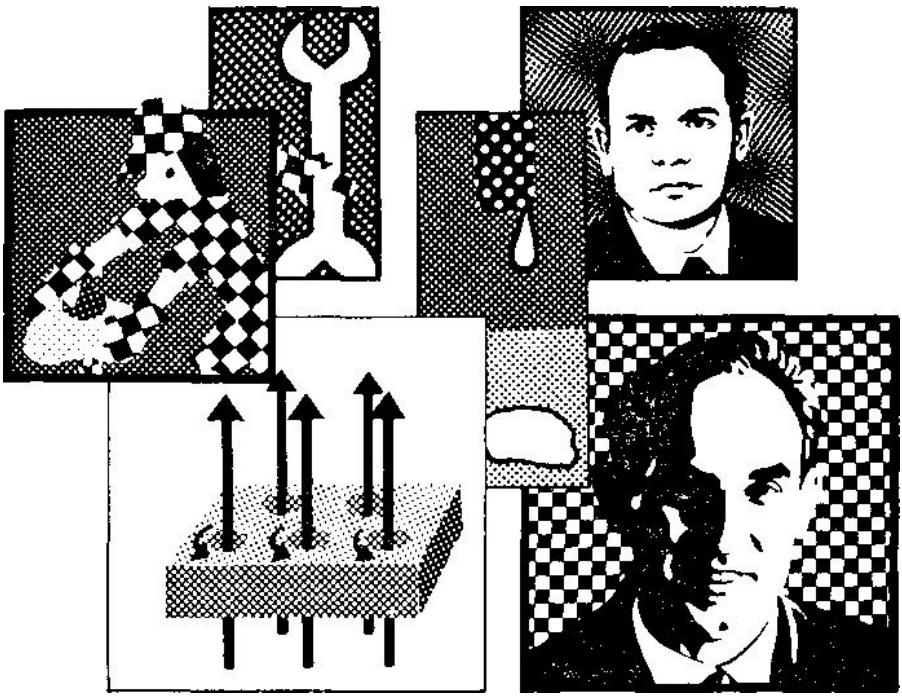
В науке случается так, что теория отстает от экспериментальных исследований. Но другой пример такого большого отставания привести трудно. Это свидетельствует о сложности и необычности проблемы сверхпроводимости.

Наука не существует изолированно от материальной жизни общества. Наиболее интенсивно проводятся научные исследования, которые обещают практический выход.

Начало второй половины XX века ознаменовалось рядом открытий в области сверхпроводимости, завершившихся разработкой теории сверхпроводимости.

В 1957 году была опубликована работа молодого советского физика Алексея Алексеевича Абрикосова, в которой впервые изложена теория сверхпроводимости сплавов.

8. Вихри в сверхпроводнике. Металлы и сплавы. Медь становится изолятором. Нужно ли «дразнить» сверхпроводник. Как ученые закрыли энергетическую щель.



Студент третьего курса физического факультета Московского государственного университета Алексей Абрикосов был самым молодым на курсе и, пожалуй, одним из самых молодых на всем факультете. Досрочно освоив школьную программу, он уже в 15 лет поступил в высшее учебное заведение.

Каждый серьезный студент, подходя к экватору пребывания в учебном заведении, начинает задумываться о своей будущей деятельности, стремиться своевременно выбрать себе научного наставника. Так было с Абрикосовым.

Среди студентов шло много разговоров о профессоре Ландау. Было известно, что он нещадно «режет» на экзаменах. Рассказывали, что в бытность в Харькове он вывесил на двери своего служебного кабинета табличку с надписью: «Осторожно, кусается!» Нетерпимый к лодырям и студентам, скользившим по поверхности знаний, он сердечно и доброжелательно относился к людям, искренне стремившимся познать науку.

В то время Ландау не преподавал на физическом факультете. Однако говорили, что он не делает различий между «своими» и «чужими» студентами. Он был готов дать путевку в науку любому — были бы способности и призвание.

Как-то не верилось, что рядовой студент мог бы запросто встретиться со всемирно известным ученым, до предела загруженным научной и преподавательской деятельностью.

Все же однажды, собравшись с духом, Алексей Абрикосов набрал номер домашнего телефона Ландау.

Терпеливо выслушав студента, профессор сказал:

— Приходите ко мне домой завтра в девять часов утра.

Так в один из осенних дней 1945 года Алексей Абрикосов очутился в квартире Ландау.

Продиктовав интеграл, профессор предложил студенту решить задачу. Затем он удалился.

Вернувшись через некоторое время, Ландау быстро

просмотрел исписанный студентом лист бумаги и, по всей видимости, остался доволен. Он предложил Абрикосову сдать теоретический минимум.

— Но я хочу стать физиком — экспериментато- ром, — возразил студент.

— Ну и что же. Теория во всяком случае вам не помешает.

Абрикосов попал в школу Ландау.

Такое название вы не встретите ни в одном официальном справочнике. Между тем школа Ландау воспитала немало талантливых физиков — теоретиков. Многие из них стали докторами наук. В их числе академики и члены — корреспонденты Академии наук СССР и республиканских академий. Лучшие представители школы Ландау являются создателями собственных научных школ. Можно сказать, что и по сей день школа Ландау играет выдающуюся роль в развитии советской и мировой теоретической физики.

Ландау готовил теоретиков еще со студенческой скамьи.

«Теоретическая физика начинается с математики», — говорил Ландау. Поэтому каждый пришедший к нему студент подвергался небольшому испытанию по математике. Студент, показавший, что он разбирается в этом предмете, приступал к изучению теоретической физики по составленной Ландау специальной программе, получившей название «теоретический минимум».

Эта программа состоит из семи разделов по теоретической физике и двух вспомогательных — по математике.

После изучения каждого раздела студент сдавал экзамен. Экзамены принимал чаще всего сам Ландау. Когда число экзаменующихся заметно увеличилось, ему стали помогать ученики.

Изучение курса и сдача экзаменов было делом добровольным. Никакого удостоверения или справки сдавший теоретический минимум не получал. Достаточно было, что после его фамилии Ландау делал в своей записной книжке соответствующую пометку.

Студенты, проявившие в процессе сдачи теоретического минимума достаточные способности, как правило, оставались в аспирантуре у Ландау либо у его учеников.

Составной частью школы Ландау был теоретический семинар.

На семинаре царила творческая, непринужденная обстановка. Обсуждались разнообразные проблемы теоретической физики, и каждый мог выбрать направление, которое ему больше по душе. Здесь всячески поощрялся свободный обмен мнений.

На семинаре Ландау Абрикосов окончательно встал на путь физика — теоретика. В 1948 году, по окончании университета, он

поступил в возглавляемый Ландау теоретический отдел Института физических проблем.

«Ввиду краткости жизни мы не можем позволить себе роскошь тратить время на задачи, которые не ведут к новым результатам», — писал Ландау в одной из своих статей.

Существенно новые результаты Ландау получил и в области сверхпроводимости.

Он разработал теорию промежуточного состояния сверхпроводников, показал, что в этом состоянии сверхпроводник состоит из последовательности нормальных и сверхпроводящих слоев, определил влияние внешнего поля на размеры и форму слоев, ввел понятие о поверхностном натяжении между нормальной и сверхпроводящей фазами.

В 1950 году Л. Д. Ландау вместе с другим известным советским физиком В. Л. Гинзбургом создали теорию сверхпроводимости, основанную на теории Ландау фазовых переходов второго рода. Эта теория уже тогда, то есть за несколько лет до появления теории БКШ и работ Боголюбова, позволила объяснить ряд существенных свойств сверхпроводников.

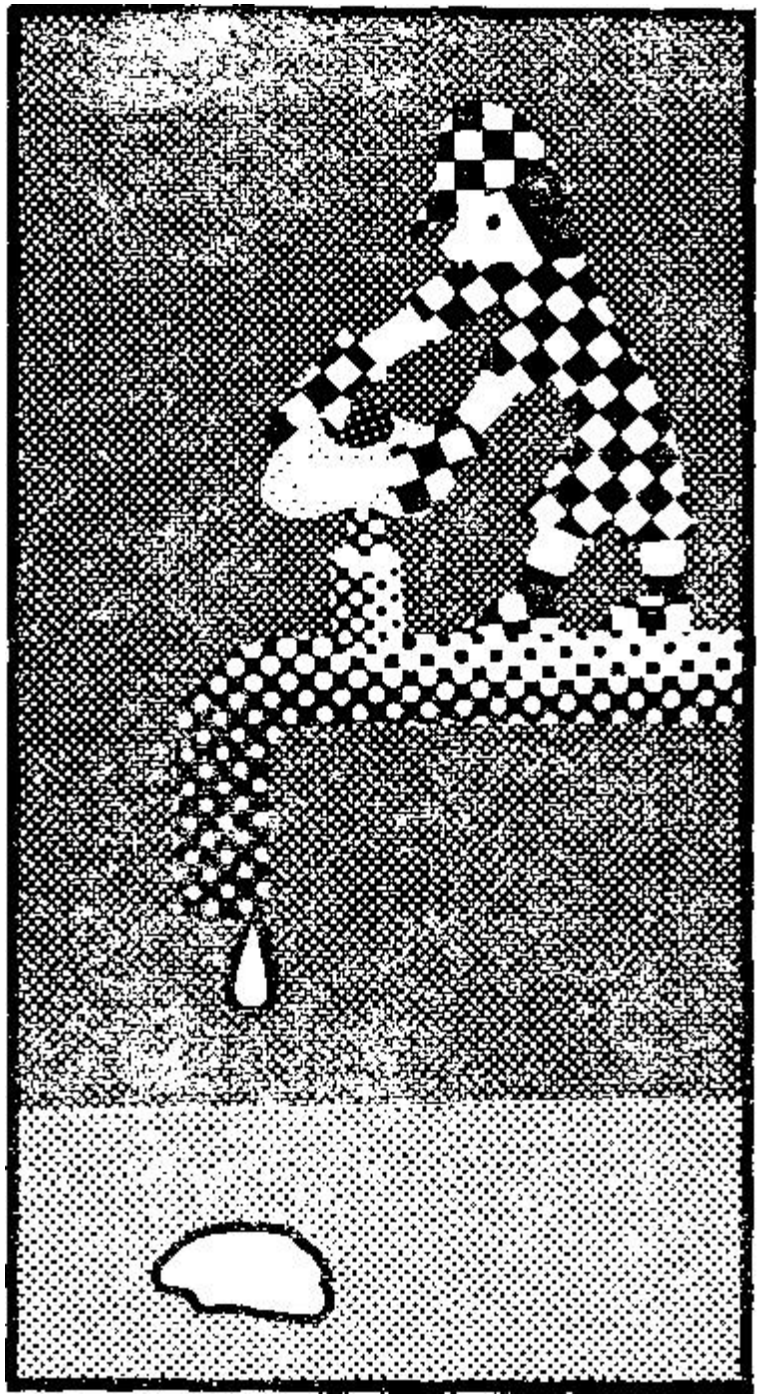
Продолжить эти исследования выпало на долю ученика Ландау, Абрикосова. Основываясь на уравнениях Гинзбурга — Ландау и результатах собственных исследований, он построил в 1957 году теорию сверхпроводящих сплавов.

Несколько позже другой ученик Ландау, Л. П. Горьков (его портрет внизу), сумел вывести уравнения Гинзбурга — Ландау из теории БКШ и объяснить физический смысл некоторых величин, введенных в эти уравнения, природа которых оставалась не вполне ясной. Разработанная советскими учеными теория сверхпроводимости металлов и сплавов получила в науке название ГЛАГ (Гинзбург — Ландау — Абрикосов — Горьков).

В 1964 году А. А. Абрикосова избирают членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1968 году ему совместно с В. Л. Гинзбургом и Л. П. Горьковым присуждают Ленинскую премию за разработку теории сверхпроводящих сплавов и свойств сверхпроводников. Л. Д. Ландау был удостоен этой высшей научной награды СССР в 1962 году.

С 1965 года Абрикосов работает в Институте теоретической физики Академии наук СССР. Одновременно он заведует кафедрой теоретической физики Московского института стали и сплавов.

В 1987 году А. А. Абрикосов избран действительным членом Академии наук СССР.



Нам предстоит рассмотреть, как теория Абрикосова объясняет «странное» поведение сверхпроводящих сплавов.

Понять эту проблему поможет следующий пример, взятый из другой области физики.

Две или большее количество небольших водяных капель

легко соединяются в одну большую каплю. Однако обратного процесса самопроизвольного разделения одной капли на несколько мелких капель не происходит.

Это явление объясняется наличием поверхностного натяжения, вследствие которого при уменьшении общей поверхности освобождается энергия.

Единая сферическая капля имеет минимальную поверхность для данного количества воды, и процесс самопроизвольного разделения на капли не осуществляется, потому что он должен привести к большей поверхности, что требует затраты энергии.

Поверхность раздела между двумя жидкостями обладает положительной поверхностной энергией. Но возможно положение, при котором эта энергия становится отрицательной.

Если предположить, что самопроизвольное сокращение поверхности раздела при положительном поверхностном натяжении объясняется наличием на этой поверхности упругой растянутой пленки, то поверхность раздела с отрицательным поверхностным натяжением должна представлять собой упругую сжатую пленку, которая может самопроизвольно расширяться.

Абрикосов ввел понятие о двух группах (родах) сверхпроводников.

Сверхпроводники первого рода обладают положительной поверхностной энергией между нормальной и сверхпроводящей фазами, а сверхпроводники второго рода — отрицательной поверхностной энергией между фазами.

К сверхпроводникам первого рода относятся практически все чистые металлы, а к сверхпроводникам второго рода — сплавы, а также тонкие пленки.

При этом сверхпроводник первого рода можно перевести во второй род путем внедрения посторонних примесей либо какого-нибудь другого нарушения периодичности кристаллической решетки.

Примечательно, что ниобий долгое время считался «отщепенцем» среди металлов. Его относили к сверхпроводникам второго рода. Однако, когда удалось получить особо чистый образец ниобия, он занял свое «законное» место среди сверхпроводников первого рода.

Эффект Мейснера обусловлен положительным поверхностным натяжением между сверхпроводящим и нормальным состояниями в металле. Магнитное поле выталкивается из толщи образца, так как для образования большей поверхности раздела между сверхпроводящей и нормальной областями понадобилась бы значительная энергия.

Наоборот, отсутствие эффекта Мейснера должно указывать

на отрицательное поверхностное натяжение. При этом условии сверхпроводник может как угодно разделяться на сверхпроводящие и нормальные области.

Поведение в магнитном поле сверхпроводников второго рода оказалось удивительным.

При увеличении внешнего магнитного поля, начиная с нулевого значения, магнитное поле первоначально не проникает в толщу образца.

Достигнув некоторого значения $H_к1$, называемого нижним критическим полем, сплав переходит в смешанное состояние. При этом магнитное поле проникает в сверхпроводник постепенно, в виде сгустков силовых линий, называемых абрикосовскими вихрями.

Внутри сгустка сверхпроводимость разрушается, но каждый сгусток окружен кольцевыми сверхпроводящими токами. Отсюда и название — вихри.

Эти вихри — квантовые. Магнитный поток, содержащийся в каждом вихре, строго равен одному кванту.

Итак, сверхпроводник оказывается пронизанным вихревыми нитями. Эти вихри, оси которых ориентированы в направлении силовых линий магнитного поля, образуют треугольную решетку. При этом в пространстве между вихрями вещество остается сверхпроводящим. Вместе с тем эффект Мейснера не проявляется. Магнитное поле в виде вихревых нитей проникает в толщу сверхпроводника.

При увеличении поля, начиная с нижнего критического поля, возрастает число вихревых нитей, и они сближаются. Соответственно увеличивается объем, занятый нормальными областями. Когда поле возрастает до величины $H_{к2}$, называемой верхним критическим полем, сверхпроводимость полностью разрушается. Вещество переходит в нормальное состояние.

Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в нашей стране и за рубежом, с полной достоверностью подтвердили теорию Абрикосова.

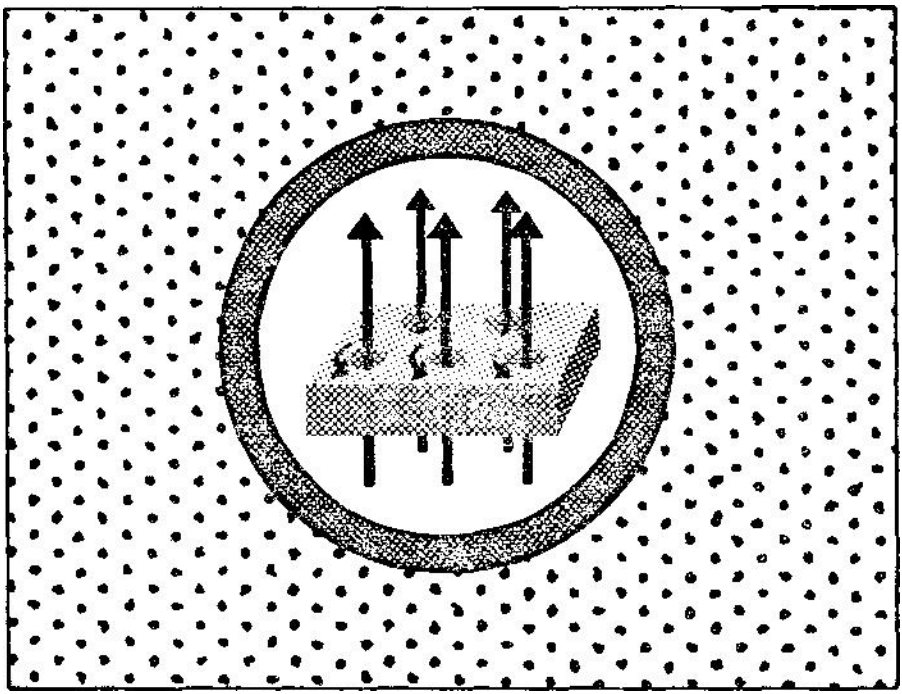
Наиболее простой эксперимент, демонстрирующий образование магнитных вихрей при переходе сверхпроводника в промежуточное состояние, заключается в том, что плоская поверхность испытываемого образца покрывается ферромагнитным порошком.

Силовые линии магнитного поля пронизывают вихревые участки и выходят из образца в хех точках поверхности, которые соответствуют положениям вихревых нитей. Ферромагнитный порошок притягивается полем и скапливается в окрестностях этих точек. При этом четко просматривается треугольная решетка

вихревых линий.

Что же происходит, когда через образец, содержащий вихревую структуру, пропускается электрический ток?

Известно, что магнитное поле действует на движущиеся заряды (токи) с силой Лоренца. С такой же силой ток действует и на вихревые нити, которые приходят в движение.



Вихри Абрикосова в сверхпроводнике второго рода. Покрыв поверхность сверхпроводника ферромагнитным порошком, можно наблюдать периодическую треугольную решетку вихревых нитей. Частички, порошка собираются в тех местах, где выходят силовые линии.

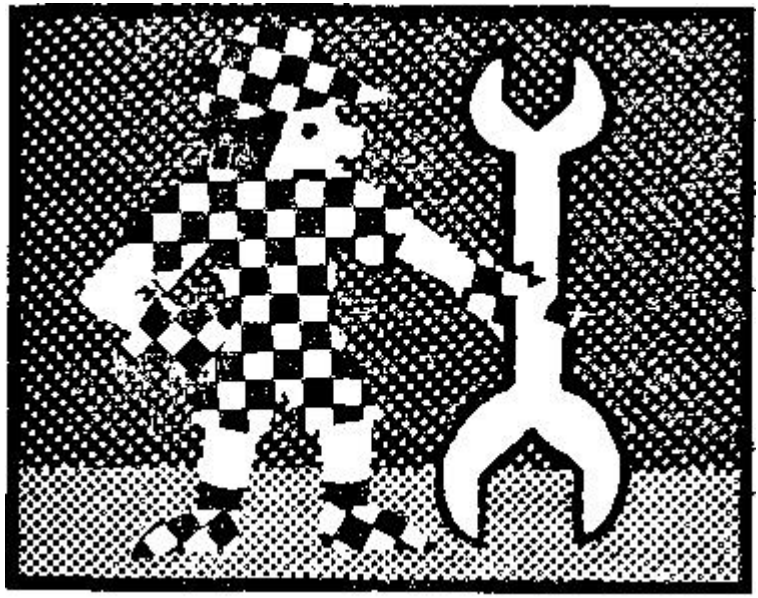
При этом нормальная фаза (напомним, что в области вихрей вещество находится не в сверхпроводящем состоянии) движется сквозь сверхпроводящие области. Возникает потеря энергии. Критический ток в таких сверхпроводниках второго рода, начиная с нижнего критического поля, становится равен нулю.

Можно ли остановить движение вихревых нитей?

Оказывается, для этого сверхпроводящий образец должен, например, содержать неоднородности. Вихревые нити притягиваются к таким неоднородностям и задерживаются на них.

Явление получило название — пиннинг (от английского: pinning — закрепление).

Отдельные вихреватые нити, закрепляясь на неоднородностях, взаимодействуют с другими вихревыми нитями и останавливают их движение.



С увеличением силы тока, протекающего через образец, увеличивается и сила, действующая на вихрь. Когда эта сила становится достаточной для того, чтобы преодолеть закрепление, вихревые нити приходят в движение.

В сверхпроводниках второго рода, содержащих неоднородности, образованные, например, в результате пластической деформации, критический ток относительно большой. Такие образцы получили название жестких сверхпроводников.

В современных сверхпроводящих установках преимущественно применяются жесткие сверхпроводники второго рода.

Из чистых металлов самое большое критическое магнитное поле (около 0,2 тесла) имеет ниобий. У сплава ниобий — титан или ниобий — цирконий верхнее критическое поле составляет 13 тесла, то есть величину в 65 раз большую, а критическая плотность тока достигает 500 тысяч ампер на квадратный сантиметр!

Критическая температура сплава ниобий — титан равна 10,3К, в то время как ни у одного из чистых металлов критическая температура не достигает 10К.

Уже получено свыше тысячи сверхпроводящих сплавов и химических соединений. Любопытно, что ни одна из составляющих, например, такого сверхпроводящего сплава, как

золото — висмут, в чистом виде сверхпроводящими свойствами не обладает.

Исследователи стремятся получить сверхпроводящие металлы и сплавы с возможно высокой критической температурой и возможно большими критическим полем и критическим током.

У сверхпроводящего сплава ниобий — олово верхнее критическое поле и плотность тока вдвое больше, чем у упомянутых выше сплавов, а критическая температура равна 18,3К.

К сожалению, сплав ниобий — олово очень хрупкий. Намотать на катушку провод из такого сплава весьма трудно.

Поэтому сплав изготавливается чаще всего непосредственно на катушке соленоида. На нее наматываются образцы исходных материалов сплава: ниобия и оловянной бронзы. При нагревании до температуры 700 °С олово из бронзы диффундирует в ниобий. Получается искомый сплав.

Еще большее верхнее критическое поле — 35 тесла — имеет сплав ниобий — германий. Его критическая температура 23,4К до недавнего времени считалась рекордной.

Ученые и инженеры успешно освоили технологию изготовления проводов из сплавов ниобий — титан и ниобий — олово. Эти сплавы являются основными материалами для сверхпроводящих магнитных систем.

Сверхпроводящий соленоид представляет собой охлаждаемую жидким гелием катушку сверхпроводящего провода, оба конца которой замкнуты накоротко. Циркулирующий в катушке незатухающий электрический ток создает мощное магнитное поле. Сейчас уже часто используются сверхпроводящие соленоиды с магнитным полем 10 тесла.

Для создания такого поля с помощью катушки с медным проводом требуется мощный генератор и громоздкая система водяного охлаждения. Такая установка представляет собой сложное инженерное сооружение.

А катушка одного из образцов сверхпроводящего соленоида с полем 10 тесла имеет диаметр всего 6 сантиметров. Затрата мощности при эксплуатации такого соленоида, определяемая в основном затратой энергии для поддержания катушки при температуре жидкого гелия, составляет всего 5 киловатт. Это в тысячу раз меньше энергии, затрачиваемой для получения аналогичного поля с помощью обычного соленоида.

В нашей стране создаются сверхпроводящие соленоиды с полем в 30 тесла. Но это не предел. Поиски сверхпроводящих материалов с возможно большим критическим полем

продолжаются.

Большие критические магнитные поля достигнуты в сверхпроводящих соединениях на основе сульфидов молибдена. У одного из таких соединений критическое поле превышает 60 тесла.

Преимущества сверхпроводящих магнитов не ограничиваются возможностью получения мощных полей при минимальной затрате энергии. Наведенный в короткозамкнутой обмотке ток сохраняет свою величину сколь угодно долгое время. Создаваемое при этом магнитное поле отличается высокой стабильностью и однородностью в достаточно большей области пространства, что особенно важно для ряда научных и практических применений.

«Зарядка» сверхпроводящих катушек осуществляется с помощью небольших низковольтных источников, снабженных устройством для регулирования электрического тока. Когда ток в катушке достигает требуемой величины, она замыкается накоротко и источник может быть отключен.

Представьте себе, что по каким-либо причинам происходит превышение критических параметров сверхпроводника и провод внезапно переходит из сверхпроводящего в нормальное состояние. Тогда колоссальная магнитная энергия, заключенная в катушке, вырывается на волю в виде тепла. При этом не только испаряется жидкий гелий, но и расплавляется сама катушка.

Понадобился материал, способный принять этот удар на себя. Такую роль призвана сыграть чистая медь, обладающая, как известно, хорошей теплопроводностью.

В современных промышленных образцах сверхпроводящие провода окружаются медными проволоками. Так как сверхпроводящий ток течет по поверхности, сверхпроводник обычно расщепляется на множество тонких проводов.

Здесь медь играет роль не только теплоотвода, но и изолятора. Это утверждение может показаться на первый взгляд парадоксальным. Ведь мы привыкли к тому, что медь является хорошим проводником электрического тока. Однако по сравнению со сверхпроводником, имеющим нулевое сопротивление, даже такой материал, как медь, с низким, по представлениям обычной электротехники, сопротивлением, является прекрасным изолятором.

Сечение сверхпроводящего провода (кабеля, шины) меняется от долей квадратного миллиметра до нескольких квадратных сантиметров, а диаметр сечения единичных жил и волокон собственно сверхпроводника — от долей микрометра до десятка микрометров. В каждом сверхпроводящем проводе может содержаться от единиц до сотен тысяч волокон.

Все больше и больше громоздких и дорогих охлаждаемых водой соленоидов с медными проводами заменяют относительно небольшими сверхпроводящими магнитами. Внедряются сверхпроводящие трансформаторы, работающие без потерь и отличающиеся исключительной компактностью.

Такие трансформаторы могут работать вообще без железного сердечника. Разрабатывается много других типов сверхпроводящих машин, аппаратов и приборов. Подробно об этом вы сможете прочесть в последующих главах.

Познакомимся еще с одним интересным открытием в области сверхпроводимости.

Сверхпроводник и магнитные вещества являются в некоторой степени антиподами. Сверхпроводник, как известно, стремится вытолкнуть магнитное поле из своей толщи.

Исследование, проведенное А. А. Абрикосовым и Л. П. Горьковым, однако, заставило по — иному отнестись к этой проблеме.

Оказывается, магнитные примеси действуют на сверхпроводник неожиданным образом.

Читатель уже знает, что сверхпроводящий ток переносится спаренными электронами, так называемыми куперовскими парами.

Для разрыва куперовских пар требуется затрата некоторой энергии. Из-за этого энергия электронов, участвующих в процессе сверхпроводимости, на некоторую величину меньше энергии нормальных электронов. Эта разница называется энергетической щелью.

При налички в сверхпроводнике магнитных примесей у части куперовских пар в результате взаимодействия с атомами этих примесей энергия связи уменьшается. С повышением концентрации примесей число таких пар увеличивается, а минимальная энергия их связи уменьшается. Наконец, при определенной концентрации примесей наименьшая энергия связи пар становится равной нулю. В таком сверхпроводнике всегда есть пары, для разрыва которых достаточно сколь угодно малой энергии.

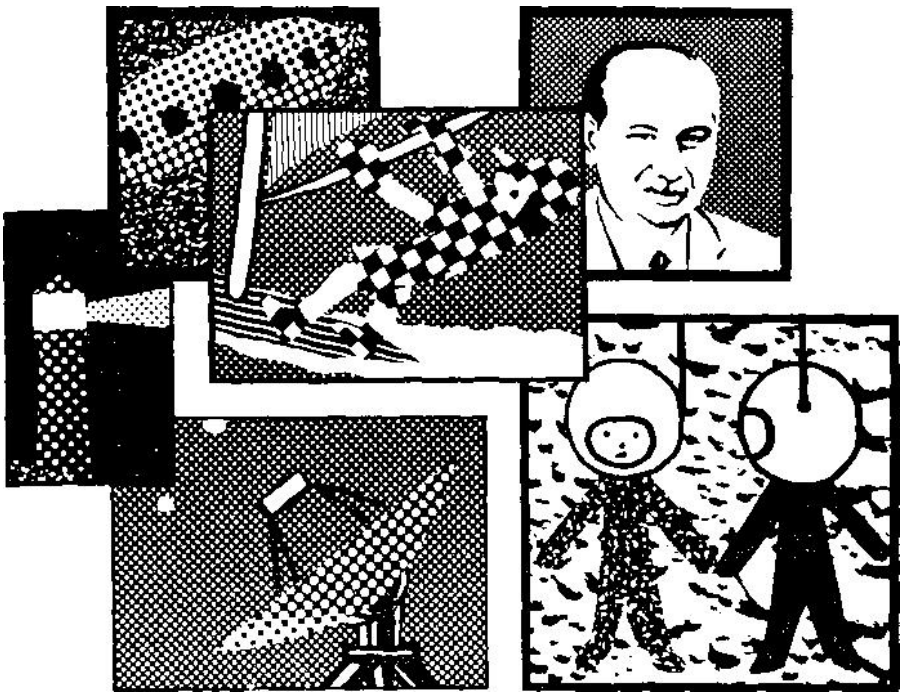
А это значит, что энергетическая щель исчезает, но сверхпроводимость сохраняется до тех концентраций примеси, пока есть пары с большей энергией связи.

Один из основоположников современной теории сверхпроводимости Джон Бардин по поводу сверхпроводников второго рода и сверхпроводников с магнитными примесями сказал, что некогда была открыта сверхпроводимость, затем был открыт эффект Мейснера и долгое время спустя открыта

энергетическая щель. Затем русские закрыли эффект Мейснера, а потом закрыли энергетическую щель.

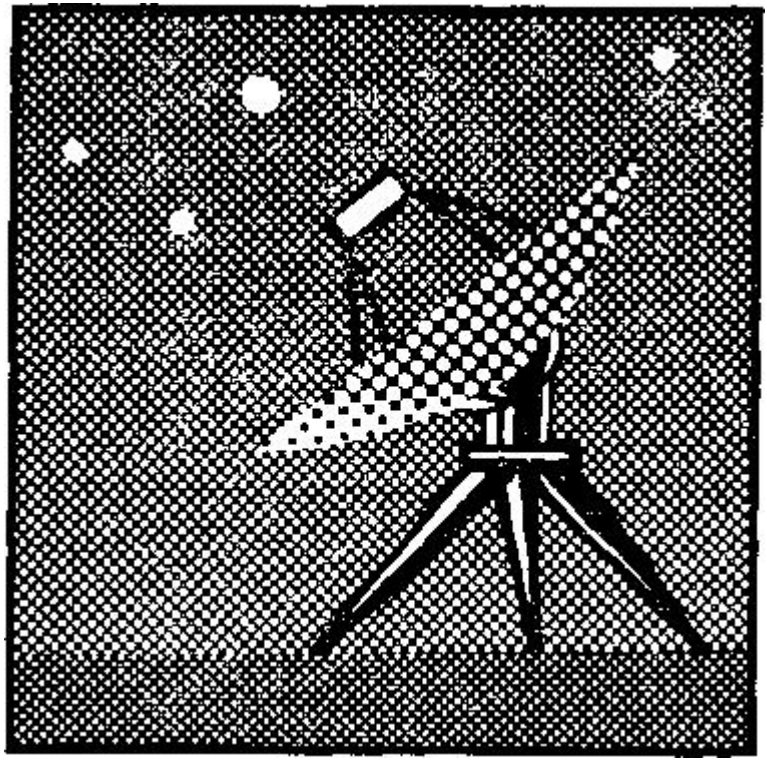
…А теперь читателю предстоит сделать скачок из микромира в мир немыслимо гигантских размеров, где наша планета Земля выглядит мельчайшей песчинкой, — в Галактику.

9. Сигналы из космоса. «Маленькие зеленые человечки». Когда молчание — золото. Рождение нейтронной звезды. Небесное тело на лабораторном столе.



Английский радиоастроном Антони Хьюиш вряд ли мог заранее предугадать, какие удивительные события произойдут после установки в обсерватории мощного длинноволнового радиотелескопа.

Закончив монтаж нового оборудования, профессор Хьюиш и его ассистентка Джоселин Белл в июле 1967 года приступили к изучению межпланетных мерцаний.



Сначала все шло как обычно. Данные, полученные с помощью мощного радиотелескопа, регистрировались, обрабатывались и наносились на карту звездного неба.

Необычное началось в августе. Самописец стал регистрировать загадочные сигналы, не характерные ни для одного из известных в то время небесных тел.

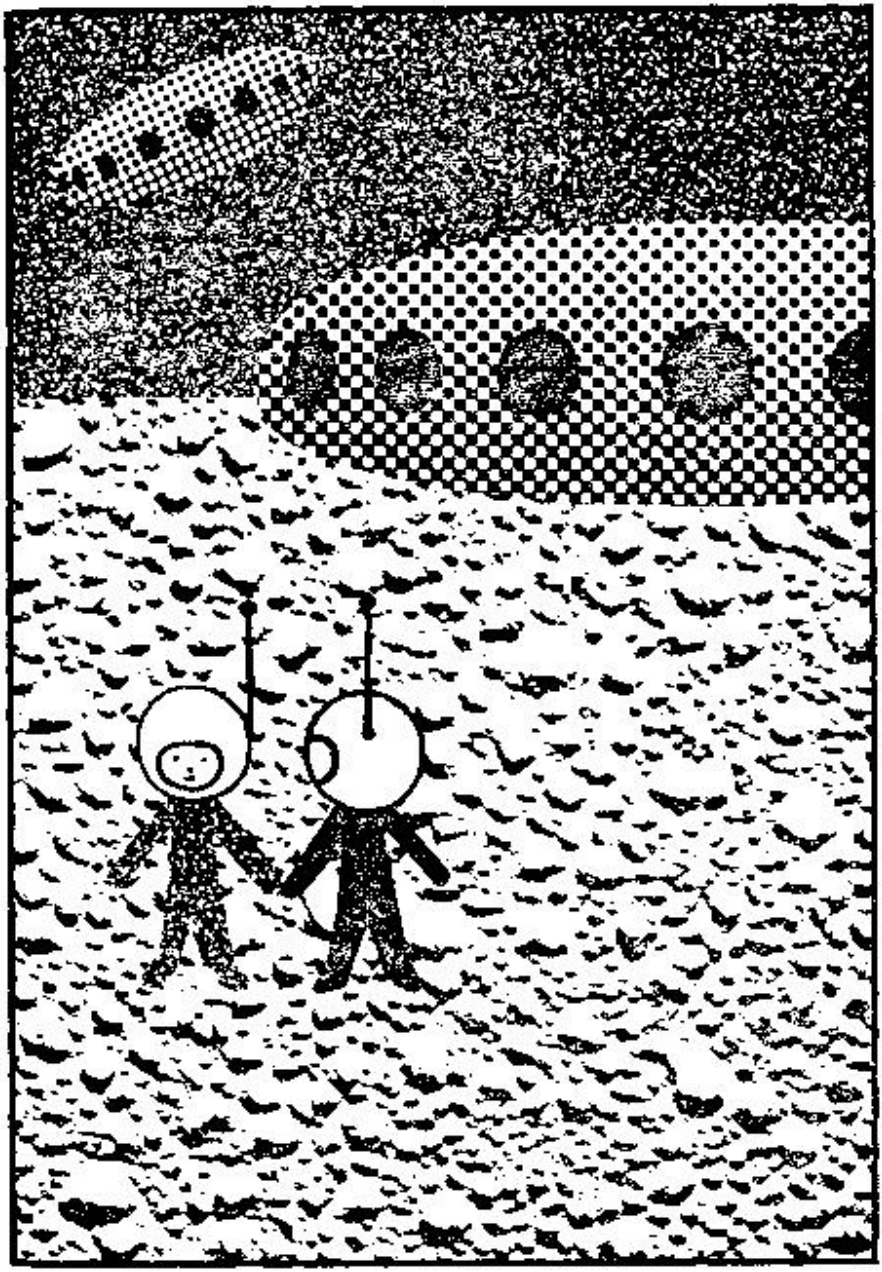
Источник этих сигналов испускал прерывистые импульсы продолжительностью около 0,3 секунды. Особенно поражало постоянство периода, то есть промежутка времени между двумя последовательными импульсами. Он составлял 1,33730110168 секунды (с точностью до одиннадцатого знака!).

На протяжении некоторого времени сигнал вообще не регистрировался. Однако время его начала с высокой точностью можно было рассчитать заранее.

Создавалось впечатление, что некая внеземная цивилизация взывает к своим инопланетным братьям по разуму.

А может быть, это подает сигналы космический корабль, стартовавший на далекой планете? Вот почему первооткрыватели сначала назвали загадочный объект LGM (little greem men), что в переводе значит: «маленькие зеленые человечки». Так в то время шутливо называли пришельцев из космоса, будто бы выходящих из «летающих тарелок».

Хьюиш и его коллеги оказались на перепутье…



Немедленно оповестить мир о своем открытии и завоевать славу пионеров связи с внеземной цивилизацией? Но тогда скромное здание Малардской обсерватории, что вблизи Кембриджа, вряд ли выдержало бы штурм вездесущих репортеров.

Английские ученые решили, что выражение «молчание — золото» как нельзя больше подходит для создавшейся ситуации.

Они условились до поры до времени держать свое открытие в глубокой тайне.

Проходили дни, недели, месяцы упорного труда. Сменялись времена года.

Тщательный анализ результатов наблюдений показал, что источником удивительного излучения является неопознанное ранее небесное тело. В дальнейшем оно получило название «пульсар», вследствие прерывистого (пульсирующего) характера его излучения.

Вскоре исследователи обнаружили на разных участках нашей Галактики еще три подобных объекта.

В феврале 1968 года Хьюиш и его коллеги опубликовали в английском журнале «Природа» статью о своем открытии.

Это вызвало громадный интерес среди исследователей Вселенной. Сообщения о новых открытиях пульсаров стали поступать из СССР, США, снова из Англии, из Австралии и других стран.

Сегодня известно несколько сот пульсаров. По- видимому, общее количество пульсаров значительно больше.

Однако современная аппаратура пока не в состоянии обнаружить их сигналы на фоне других космических источников.

Почти сразу после открытия пульсаров астрофизики высказали предположение, что пульсары — это так называемые нейтронные звезды. Примечательно, что гипотеза о возможности существования нейтронных звезд была выдвинута Ландау еще в 1932 году, то есть всего через год после открытия нейтрона.

Излучение обычных звезд связано с протеканием в их недрах, где температура исчисляется миллиардами градусов, термоядерных реакций. В этом смысле звезду можно представить себе как гигантский термоядерный котел, заполненный высокотемпературной плазмой.

Напомним, что высокотемпературная плазма представляет собой газ, состоящий из практически «голых» ядер и электронов.

Такая система не устойчива. По мере выгорания ядерного «топлива» (водорода и гелия) гравитационные силы стремятся сжать ядро звезды. С течением времени плотность вещества существенно увеличивается. Протоны, входящие в состав атомных ядер, захватывают электроны. Происходят реакции превращения протонов в нейтроны: вещество нейтронизируется.

Одновременно под действием силы газового давления разбухает оболочка звезды. Когда эта сила превышает критическую величину, оболочка взрывается, устремляясь в пространство. Происходит, как говорят астрономы, вспышка сверхновой звезды.

Сжатие ядра прекращается, и образуется устойчивое тело: нейтронная звезда, состоящая в основном из нейтронов.

Согласно современным представлениям, если масса сверхновой звезды превышает массу Солнца в три — пять раз, то вещество сжимается неограниченно и образуется так называемая «черная дыра».

Нейтронная звезда представляет собой быстро вращающееся вокруг своей оси сверхплотное тело. Масса одного кубического сантиметра ее вещества равна 100 миллионам тонн! Это очень маленькое в астрономическом масштабе тело: ее диаметр равен десяти — пятнадцати километрам. Вместе с тем феноменальная плотность делает ее массу сопоставимой с массой Солнца.

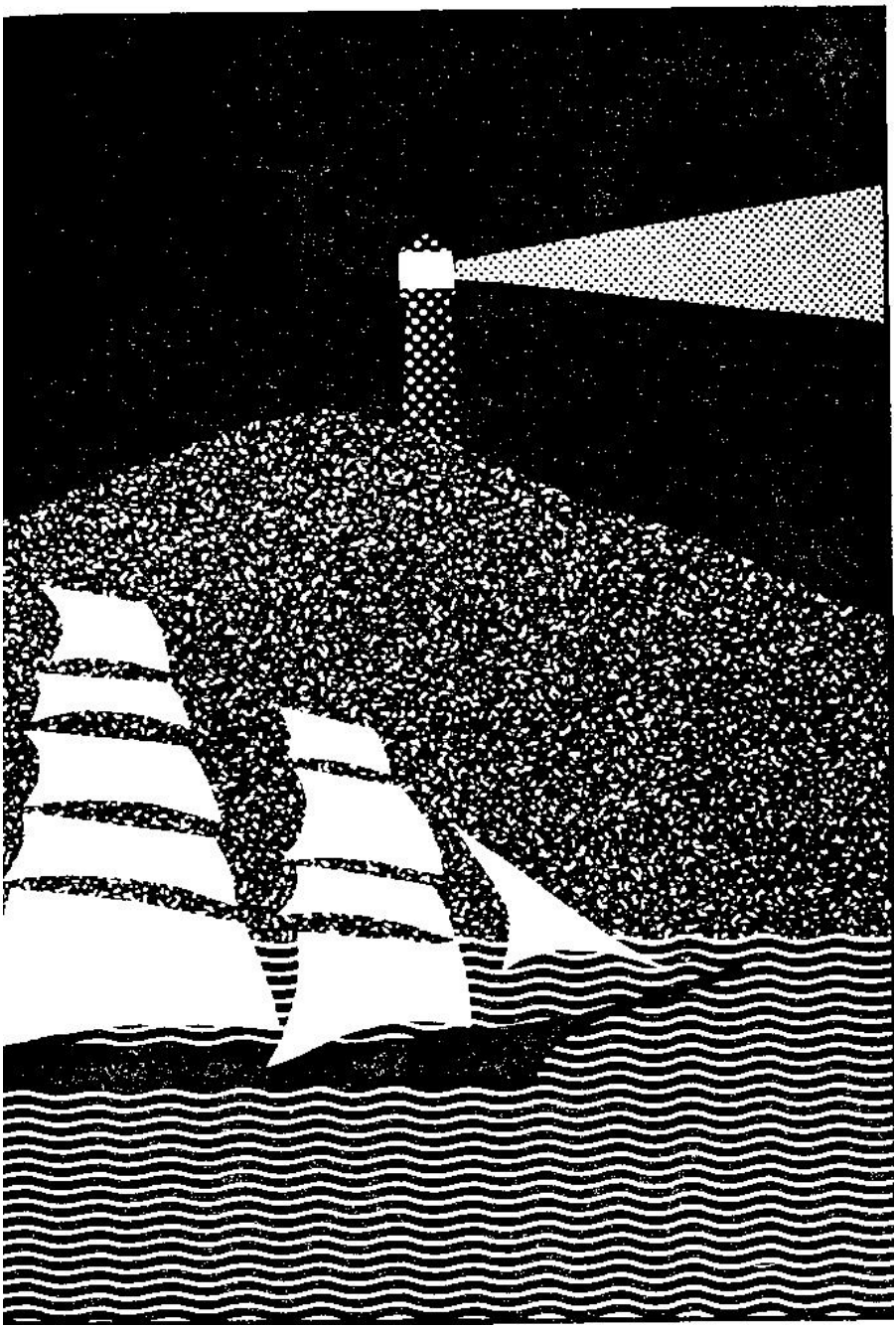
Вспышку сверхновой звезды, в результате которой возникла так называемая Крабовидная туманность, наблюдали в 1054 году китайские астрономы.

В декабре 1968 года трое молодых исследователей Вселенной из обсерватории Стюарда при Аризонском университете (США) — Кок, Дисней и Тейлор — обнаружили в Крабовидной туманности пульсар.

Это открытие, казалось, послужило убедительным доводом в пользу гипотезы о том, что пульсар — это нейтронная звезда.

Простейшим «пульсирующим телом» является равномерно вращающийся маяк, излучающий узкий пучок света. При этом на корабле, находящемся в море, наблюдаются периодические вспышки. Они повторяются через промежуток времени, равный периоду вращения маяка, а продолжительность вспышки определяется шириной пучка света.

Когда вращающаяся звезда излучает узкий пучок, то в момент, когда этот пучок направлен к наблюдателю, последний зарегистрирует импульс излучения. Интервал между двумя последовательными импульсами излучения должен соответствовать одному обороту звезды вокруг ее оси.



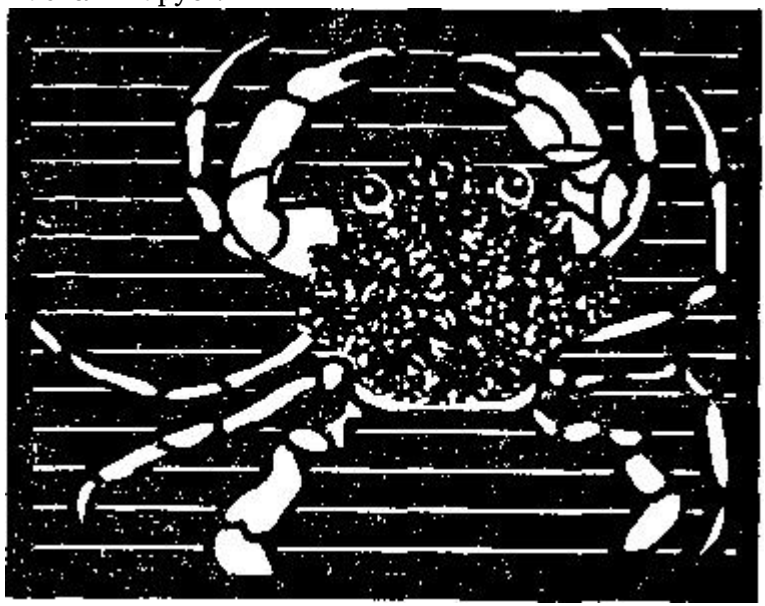
Нейтронная звезда долгое время была лишь математической абстракцией. Никто не мог быть уверен, что она существует в природе.

Казалось, с открытием пульсаров «голубая мечта» теоретиков получила реальное воплощение. Однако для получения

убедительных доказательств того, что пульсар действительно является нейтронной звездой, теоретикам и экспериментаторам предстояло еще немало потрудиться.

В то время как физики — теоретики стремились познать природу пульсаров, радиоастрономы продолжали наблюдать поведение этих удивительных небесных тел.

Особый интерес вызвали два пульсара. С одним из них читатель уже знаком. Это «Краб» из Крабовидной туманности. Второй, который находится на другом участке нашей Галактики, называется «Парус».



У обоих пульсаров было обнаружено явление «сбоя» — скачкообразного уменьшения периода вращения.

Сам факт убыстрения вращения этих небесных тел не мог удивить астрономов. Внезапное изменение периода ряда звезд неоднократно наблюдалось и ранее. Поражало связанное со сбоями поведение пульсаров. Оказалось, что после сбоя период пульсара изменяется продолжительное время: три месяца у «Краба» и два года у «Паруса», после чего происходит следующий сбой.

Вполне возможно, что тайна «маленьких зеленых человечков» осталась нераскрытой и по сей день, если бы не были известны такие явления, как сверхпроводимость и сверхтекучесть.

Межэлектронное притяжение в сверхпроводниках, как читатель уже знает, приводит к образованию связанных пар электронов.

Оказывается, что такое явление присуще не только электронному газу, но и многим другим системам микрочастиц.

Так, в атомных ядрах, где взаимодействие между частицами очень велико, образуются связанные пары протонов и связанные пары нейтронов, похожие на электронные пары в сверхпроводниках. В этом смысле можно говорить о сверхпроводимости атомного ядра.

Разумеется, непосредственно наблюдать сверхпроводимость такой микроскопической системы, как атомное ядро, невозможно. Здесь сверхпроводящее состояние проявляется в ряде побочных явлений, например, в процессе поглощения атомным ядром падающего излучения.

Иное дело, нейтронная звезда, которая представляет собой, по сути, гигантское атомное ядро, состоящее в основном из нейтронов.

В недрах звезды нейтронное вещество находится в жидком состоянии. При этом нейтронная жидкость разбивается на связанные пары нейтронов, подобные куперовским электронным парам в сверхпроводнике, а следовательно, пребывает в сверхтекучем состоянии.

Нейтронную звезду можно себе представить как тело, состоящее из сравнительно тонкой твердой оболочки, заполненной сверхтекучей жидкостью.

Одним из первых ученых, выдвинувших гипотезу о сверхтекучем состоянии нейтронных звезд, был ученик Ландау, ныне академик А. Б. Мигдал.

В связи со сбоями была выдвинута гипотеза «звездотрясения», сущность которой вкратце заключается в следующем.

В результате быстрого вращения пульсар несколько сплющивается у полюсов.

С течением времени скорость вращения пульсара медленно уменьшается. Поэтому равновесие постепенно нарушается и звезда «старается» принять форму более близкую к сферической. Такое изменение формы происходит внезапно и приводит к частичному разрушению коры. При этом скорость вращения вокруг оси твердой оболочки звезды изменяется скачком.

Однако сверхтекучая нейтронная сердцевина звезды не увлекается корой и продолжает вначале вращаться с прежней скоростью. Напоминаем, что подобное явление наблюдается при вращении сосуда с гелием II.

Скорости вращения твердой коры и сверхтекучей нейтронной жидкости выравниваются очень медленно. Этим объясняется зависимость периода пульсара от времени.

По расчетам астрофизиков, звездотрясение — явление очень редкое. Оно может происходить один раз за несколько сот лет.

Так почему же у всех известных пульсаров интервал времени

между двумя последовательными скачками скорости исчисляется несколькими годами и даже месяцами?

И физики вспомнили еще об одном явлении, наблюдаемом в гелии II.

Если сосуд с гелием II вращается, то уже при сравнительно небольшой угловой скорости вся жидкость пронизывается тонкими воронками — вихревыми нитями, параллельными оси вращения.

Не останавливаясь подробно на природе этих вихрей, заметим, что их можно уподобить квантовым вихревым нитям магнитного поля, проникающим в сверхпроводник второго рода, или, как их часто называют, вихрям Абрикосова. Напомним, что о них рассказывалось в главе восьмой.

Вращение пульсара приводит к тому, что его сверхтекучая нейтронная сердцевина оказывается пронизанной вихревыми нитями.

Возникновение и распад вихревых нитей подчиняются достаточно сложным закономерностям, на которых мы не имеем возможности остановиться в этой книге.

Оказалось, что теория, основанная на сверхтекучести нейтронной жидкости и закономерностях ее вихревой структуры, дает вполне удовлетворительное объяснение поведения пульсаров.

Здесь автор считает уместным, не опасаясь упрека в повторении, снова привести любимое изречение Ландау: «Верховным судьей каждой теории является опыт».

И на этот раз свой «приговор» предстояло вынести грузинским физикам.

После защиты докторской диссертации в Институте физических проблем, в конце сороковых годов, Элевтер Луарсабович Андроникашвили вернулся в Тбилиси.

В эти послевоенные годы физика в Грузии развивалась быстрыми темпами. Назрела необходимость организации в республике единого физического центра.

В 1951 году был основан Институт физики Академии наук Грузинской ССР. Организатором и бессменным директором этого института является академик Академии наук Грузинской ССР Э. Л. Андроникашвили. Здесь под его руководством, а в ряде случаев при его непосредственном участии проводятся исследования по многим направлениям современной физики.

Летом 1961 года Нильс Бор посетил грузинский физический институт.

Семидесятипятилетний патриарх физики был под свежим впечатлением встречи в Москве со своим любимым учеником. Ландау с юношеской прытью первым подбежал к выходу с трапа самолета на Шереметьевском аэродроме, и Бору показалось, что перед ним не прославленный академик, а тот самый молодой человек, впервые переступивший порог его института в Копенгагене сорок лет тому назад, которого он встретил тогда своим традиционным приветствием: «Хорошо, что вы приехали! Мы у вас многому научимся».

Все дни, что Бор провел в Москве, он почти не расставался с Ландау. Двум корифеям современной физики предстояло обсудить немало проблем.

В Тбилиси Бор убедился в том, что и у грузинских физиков можно «многому научиться». Некоторые из проведенных здесь работ по экспериментальной и теоретической физике явились существенным вкладом в мировую науку.

Помнят здесь и об одном из основных «заветов» Ландау, относящемуся к сверхтекучему жидкому гелию.

Эта удивительная квантовая жидкость по — прежнему вызывает неослабеваемый интерес у физиков всего мира. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования способствуют все более глубокому пониманию ее свойств. Так, в течение последних двух десятилетий возникла новая наука: квантовая гидродинамика жидкого гелия.

Немаловажную роль в становлении этой науки сыграли ученые Института физики Академии наук Грузинской ССР.

За цикл работ по исследованию свойств вращающегося гелия II, начатых в Институте физических проблем, Андроникашвили был удостоен Государственной премии. Он и сотрудники его института продолжают интенсивное исследование этой замечательной квантовой жидкости.

Не случайно, именно в грузинском институте физики были проведены эксперименты, убедительно подтвердившие гипотезу сверхтекучести в недрах нейтронных звезд.

На этот раз перед экспериментаторами стояла задача исключительной сложности.

Грузинские ученые создали уникальную установку: модель пульсаров. В ней нейтронная жидкость моделируется сверхтекучим гелием, заполняющим сосуды различной формы. Сосуды подвешены на магнитной подвеске и могут совершать равномерное вращение. По воле экспериментаторов им сообщаются электрическими импульсами толчки, имитирующие различного рода возмущения, например, звездотрясение.

И вот небесное тело «препарируется» на лабораторном столе. Внутри вращающегося сосуда рождаются и исчезают незримые вихревые нити. Перо самописца автоматической электронной измерительной системы бесстрастно регистрирует изменение вращения далекого пульсара.

Разработчики установки отец и сын Дж. С. и С. Дж. Цакадзе вывели математические уравнения, описывающие сложные закономерности поведения модели. Когда в эти уравнения были подставлены значения параметров, характеризующих пульсары, то оказалось, что измерения на модели с достаточно высокой

точностью соответствуют данным о пульсарах, известных из радиоастрономических наблюдений.

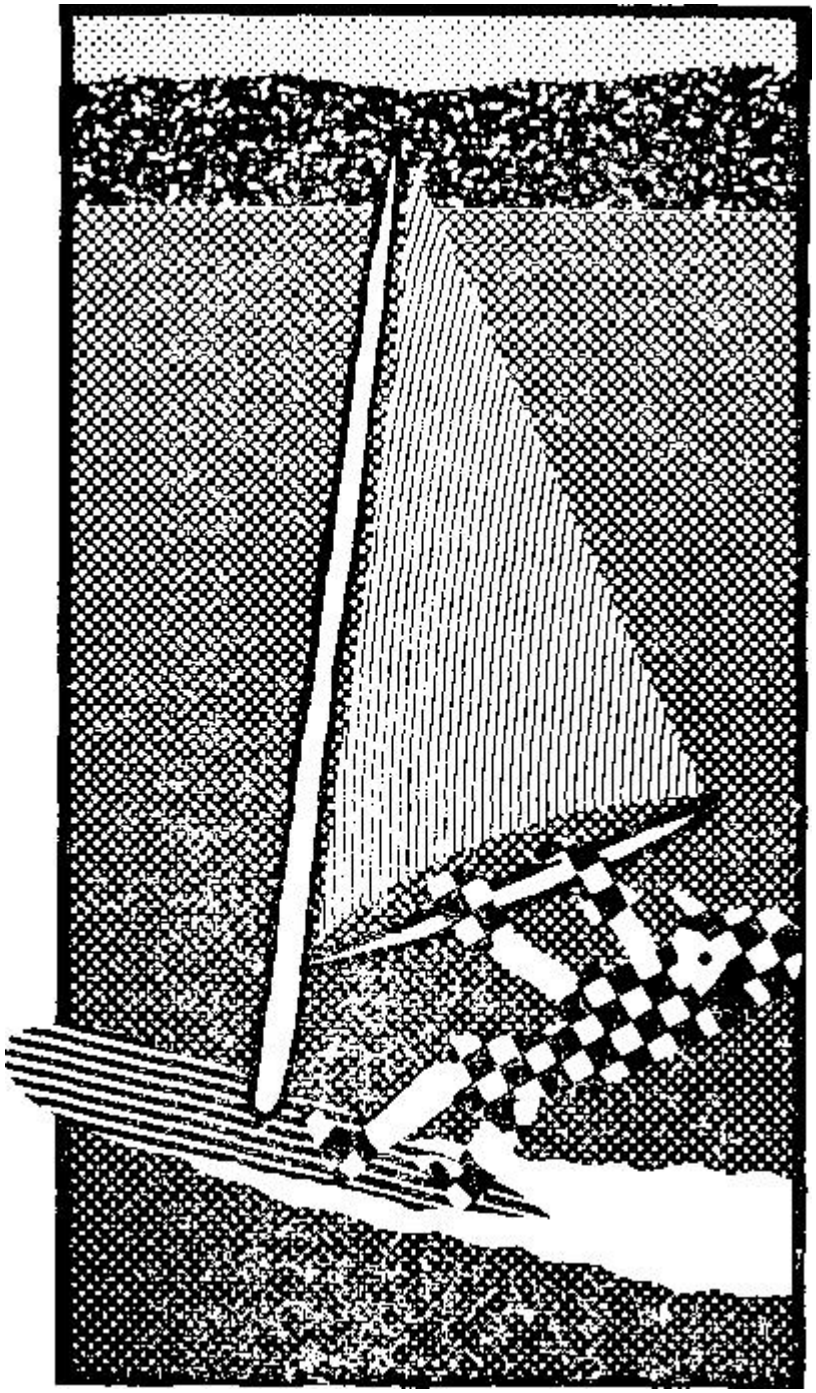
Проведенные исследования показали, что изменение периода пульсара может происходить двумя путями. Либо сначала ускоряется твердая оболочка пульсара (например, в результате звездотрясения), а затем вовлекается во вращение сверхтекучая жидкость. Либо в результате распада избыточной части вихрей ускоряется сверхтекучая жидкость с последующим ускорением твердой оболочки.

Практически наблюдаются оба типа ускорения.

В начале семидесятых годов радиоастрономы наблюдали «сбой» пульсара «Парус». Многие авторитетные ученые-астрофизики высказали предположение, что следующий скачок скорости этого пульсара должен произойти примерно через двести лет.

— Нет, — возразили тбилисские исследователи. — Очередной «сбой» пульсара «Парус» следует ожидать через два года.

Прогноз грузинских ученых оправдался с точностью до одного месяца!



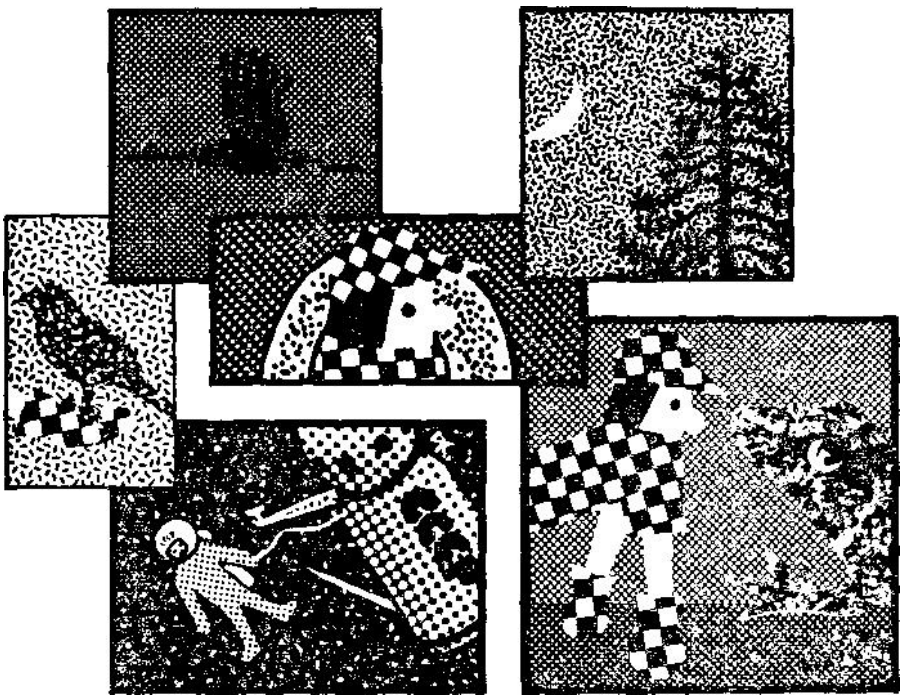
После открытия сверхпроводимости ученые почти сразу представили, какие практические возможности сулит это явление.

Даже много лет спустя после открытия сверхтекучести считалось, что это явление имеет сугубо теоретический интерес.

Когда стала ясна природа нейтронных звезд, значение

сверхтекучести выросло до масштабов Вселенной.

10. Скафандры для сверхпроводников. В плену у гелиевых температур. О лягушке, полимерах и металлическом водороде. Синица в руках или журавль в небе? Двойная сенсация.



Человек, выходя в открытый космос, облачается в скафандр, изолирующий его от внешней среды. Внутри скафандра созданы условия, благоприятные для жизнедеятельности человеческого организма.

Сверхпроводники, о которых шла речь в предыдущих главах, как бы пришли к нам из мира, где царят немыслимо низкие температуры. Чтобы они могли существовать рядом с нами, пришлось создавать привычную для них атмосферу: заключать их в своего рода скафандры — оболочки, внутри которых циркулирует жидкий гелий.

Читатель уже знает, что гелий — газ редкий и дорогой. Конденсация его в жидкое состояние требует немалых затрат. Жидкий гелий быстро нагревается и выкипает, если его тщательно не изолировать в специальной многоступенчатой

емкости. Обычно в сверхпроводящих устройствах оболочка с жидким гелием в свою очередь заключается в оболочку, где циркулирует жидкий азот. Это тоже обходится недешево и создает немалые технические трудности.

Применение сверхпроводников, охлаждаемых жидким гелием, экономически и технически оправдано только при решении особо сложных проблем, где обычные средства оказываются бессильными.

Может ли существовать сверхпроводимость если не при комнатной температуре, то хотя бы при температурах, достижимых с помощью жидкого водорода или жидкого азота — веществ гораздо более доступных и менее «привередливых», чем жидкий гелий? Такой вопрос уже давно поставили перед собой ученые.

В науке возникла проблема высокотемпературной сверхпроводимости.

В обыденной жизни высокими температурами считают те, которые выше комнатной. В мире сверхпроводимости высокими считаются температуры даже значительно ниже нуля градусов по Цельсию.

Вполне естественно стремление исследователей получить сверхпроводники с возможно большей критической температурой.

Напоминаем, что первый сверхпроводник — ртуть с критической температурой 4,2К — был открыт в 1911 году. Через два года максимальная критическая температура повысилась на 3К. Был открыт сверхпроводящий свинец с критической температурой 7,2К. А чтобы повысить максимальную критическую температуру еще на 2К, понадобилось 17 лет. В 1930 году был открыт сверхпроводящий ниобий с критической температурой 9,2К.

Относительно большого повышения максимальной критической температуры удалось добиться в 50–х годах с появлением сверхпроводящих сплавов. А в 1973 году промелькнула надежда освободиться из плена гелиевых температур, то есть температур, достижимых с помощью жидкого гелия. Был получен сверхпроводящий сплав ниобий — германий с критической температурой 23,4К.

Температура кипения водорода 20,4К. Значит, принципиально возможно охладить сплав ниобий- германий с помощью жидкого водорода. Но работать со сверхпроводниками в области температур, близких к критическим, невыгодно, а подчас невозможно из-за снижения критического магнитного поля и критического тока. Ведь при критической температуре

критическое магнитное поле и критический ток равны нулю и увеличиваются по мере отхода от критической в сторону более низких температур.

Установленный в 1973 году рекорд критической температуры 23,4 К в течение долгих лет оставался непревзойденным. У некоторых физиков этот период получил название «смутного времени сверхпроводимости».

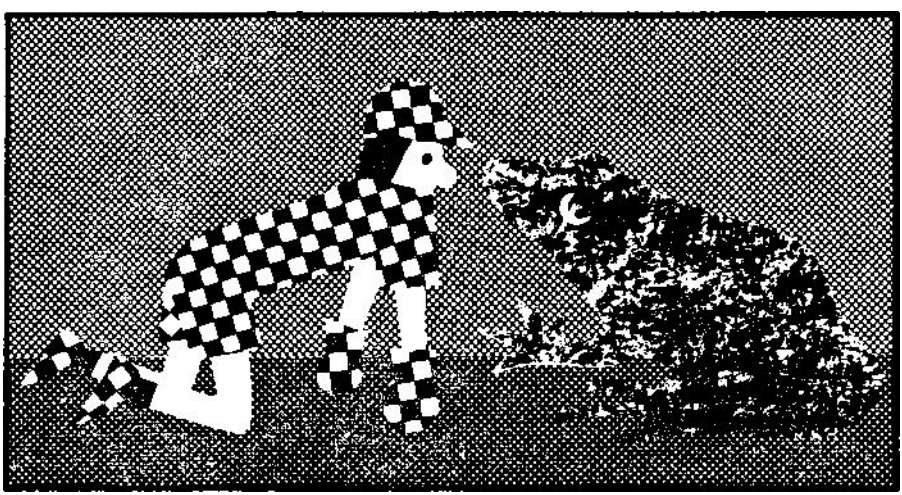
В чем причина такого застоя?

Теоретические расчеты показывают, что сверхпроводимость, возникающая благодаря межэлектронному притяжению в результате взаимодействия электронов с кристаллической решеткой металла, принципиально осуществима при критической температуре до 25–30 К.

В то время исследователи уже приблизились к этому пределу, и надо было изыскивать другие возможности повышения критической температуры.

«А может быть, стоит опять прибегнуть к помощи… лягушки?» — подумали ученые.

Ведь, препарируя лягушку, итальянский профессор Луиджи Гальвани пришел к мысли о существовании животного электричества.



Можно без преувеличения сказать: именно с опытов Гальвани началась история современной электротехники.

Вот что сказал по этому поводу во вступительном слове на X Международной конференции по физике низких температур академик П. Л. Капица:

> «Мы не должны забывать, что в природе, в частности в живых организмах, металл не используется для передачи электрических импульсов. Наши нервы, по

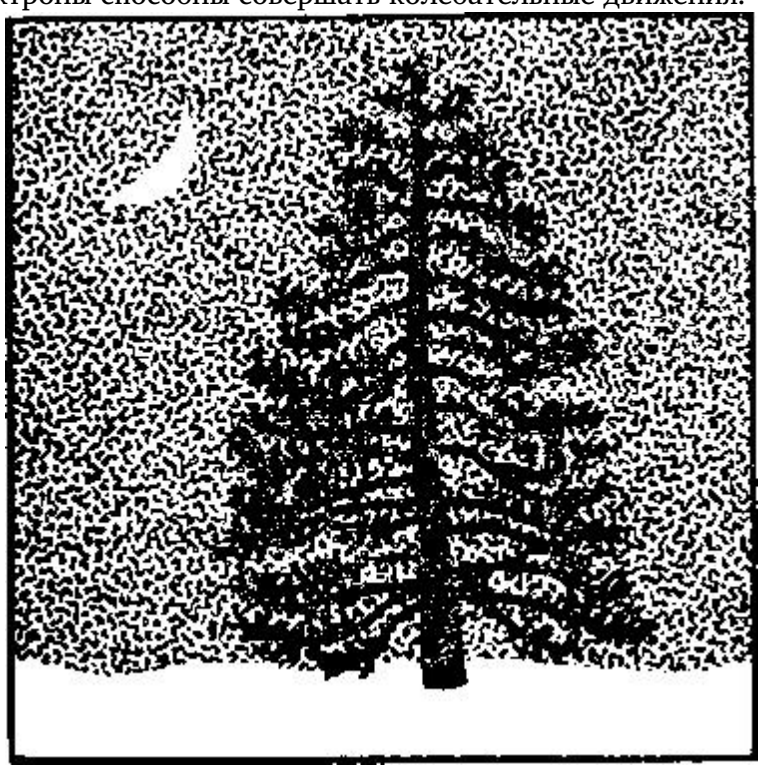
которым проходят электрические импульсы, имеют не металлические свойства, и значит, что в природе существует механизм, который может передавать электрический импульс по среде, имеющей полимерную структуру».

Теоретическая разработка проблемы высокотемпературной сверхпроводимости началась в 1964 году с появлением работ американского физика

В. Литтла и крупного советского физика академика Виталия Лазаревича Гинзбурга.

Теоретическая модель Литтла основана на использовании полимеров. Напомним, что полимеры — это вещества, состоящие из макромолекул, то есть молекул, содержащих большое количество (вплоть до десятков и тысяч) валентно связанных атомов.

Эта модель представляет собой полимер с главной осью, вдоль которой перемещаются электроны проводимости. От главной оси отходят боковые ветви, причем содержащиеся в них электроны способны совершать колебательные движения.



Электрон проводимости посредством кулоновских сил вызывает смещение электронов в боковой ветви. В результате этого смещения в боковой ветви происходит поляризация, и на

ближайшем к глазной оси конце боковой ветви наводится положительный заряд. Этот заряд притягивает к себе другой электрон главной оси.

Получается картина, схожая с той, которую мы наблюдаем при сверхпроводимости в обычном проводнике. Но роль кристаллической решетки теперь играют боковые ветви полимера.

Электроны на боковых ветвях могут быть более подвижными, чем ионы кристаллической решетки, и притяжение, которое они создают между электронами на главной оси полимера, проявляется сильней, чем в обычном сверхпроводнике. По идее это должно было бы привести к высокотемпературной сверхпроводимости.

Хотя сейчас уже открыты полимерные сверхпроводники, их критическая температура очень мала.

Другой механизм сверхпроводимости, не связанный со взаимодействием электронов с решеткой кристалла, был предложен В. Л. Гинзбургом.

Если на поверхность тонкого металлического образца нанести слой диэлектрика, то взаимодействие между электронами в металле усиливается в результате относительно легкой поляризуемости диэлектрика, что может привести к высокотемпературной сверхпроводимости.

Представьте себе этакий «сандвич» (это название утвердилось и в науке), состоящий из тонкой металлической пленки, с обеих сторон покрытой слоями диэлектрика.

Движущиеся в металле электроны проводимости поляризуют диэлектрик, создавая поблизости избыточный положительный заряд, который обуславливает возможность притяжения электронов.

Большие надежды ученые связывали с металлическим… водородом.

Может ли вообще существовать металлический водород?

Современная наука дает положительный ответ на этот вопрос.

Каждое вещество, подвергаемое действию все возрастающего давления, должно, в конце концов, перейти в металлическое состояние.

Идея о переходе молекулярного водорода в металлическое состояние имеет многолетнюю историю. Она была высказана в связи с изучением структуры так называемых водородных планет Юпитера и Сатурна, твердая оболочка которых состоит, по — видимому, в основном из водорода и гелия.

Предполагается, что источником энергии, излучаемой

водородными планетами, является гравитационное сжатие, сопровождаемое переходом водорода в металлическое состояние.

Полный расчет уравнений состояния водорода в структуре водородных планет сделал в 1964 году А. А. Абрикосов.

Несоизмеримо возрос интерес к металлическому водороду в конце 60–х годов, когда произведенные расчеты показали, что это вещество может перейти в сверхпроводящее состояние при температуре значительно более высокой, чем все ранее известные сверхпроводники.

Правда, на пути к металлическому водороду немало технических трудностей.

Надо не только сжать исходное вещество давлением порядка двух — трех миллионов атмосфер. Необходимо перевести металлический водород, как говорят физики, в метастабильное состояние, то есть он должен сохранить свои свойства и при нормальном атмосферном давлении.

Вместе с тем внимание исследователей высокотемпературной сверхпроводимости привлекло и другое водородоподобное

соединение, одной из составных частей которого являются… дырки.

Можно ли мыслить дырку от бублика без… бублика? В обыденной жизни «дырка от бублика» лишь образное выражение. Однако в микромире «дырки» как бы обретают самостоятельное существование.

Если, например, атом кристалла полупроводника теряет один валентный электрон, то, грубо говоря, образуется свободное место, которое так и называется: «дырка», несущая положительный заряд.

Дырка и электрон, в силу электростатического притяжения между ними, при определенных условиях образуют единое целое, получившее название «экситон». Это понятие впервые было введено в науку в 1931 году выдающимся советским физиком Я. И. Френкелем.

Экситон по своим свойствам похож на атом водорода.

Если масса дырки значительно больше массы электрона, то экситоны полупроводника могут образовывать периодическую решетку, аналогичную решетке из протонов и электронов в твердом водороде.

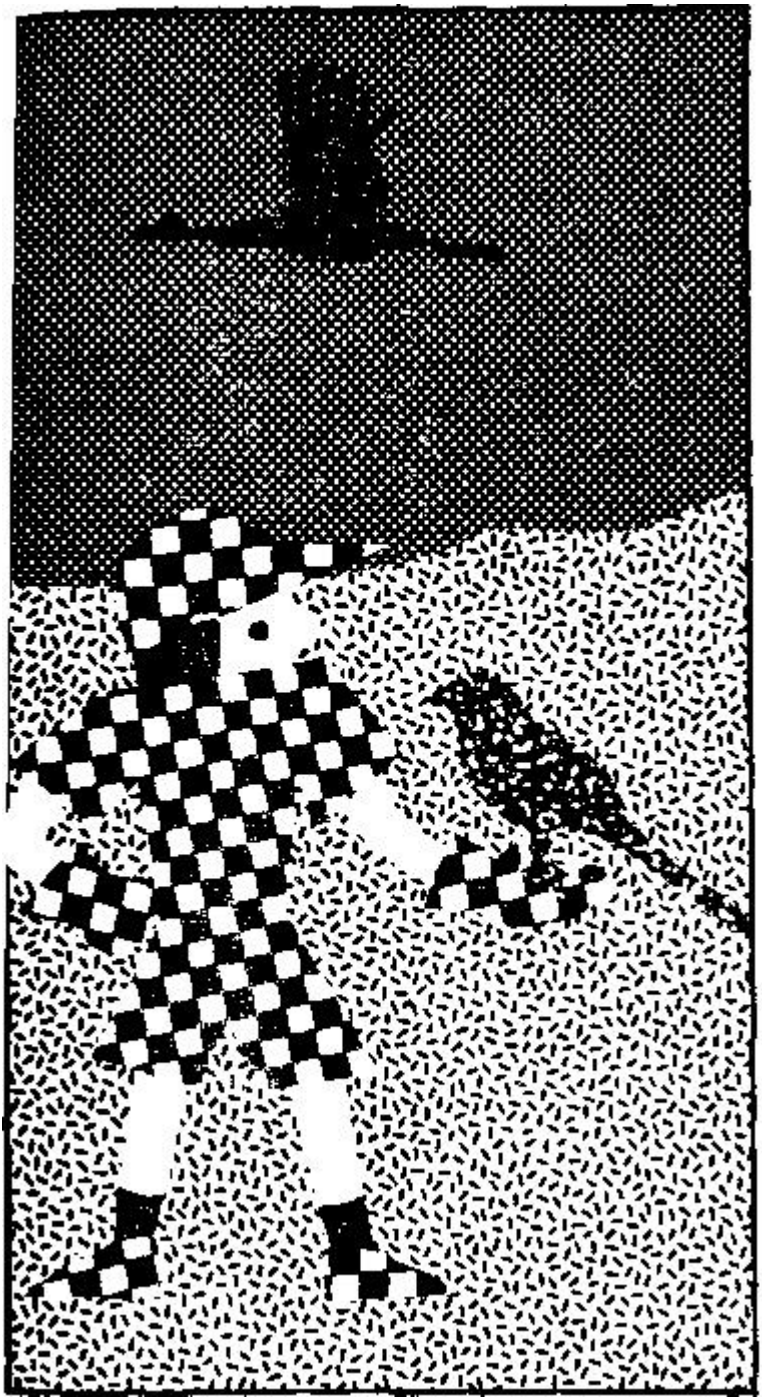
Такой полупроводник может быть переведен в металлическое состояние при давлении в 100 раз меньшем, чем это требуется для получения металлического водорода. Как показало теоретическое исследование А. А. Абрикосова, полупроводник с решеткой из «дырок» должен обладать, подобно металлическому водороду, высокотемпературной сверхпроводимостью.

Обсуждались и другие теоретические модели. Но получить вещество, в котором практически осуществился бы тот или иной механизм высокотемпературной сверхпроводимости, долгое время не удавалось.

Это не могло не разочаровать исследователей, рассчитывающих на сиюминутный успех. Считая, что лучше иметь синицу в руках, чем журавля в небе, они переключились на решение более «легких» проблем.

Другие сочли, что исследования по сверхпроводимости достигли последнего рубежа и дальнейший успех в этой области принципиально невозможен.

К их числу относился, в частности, видный американский физик Б. Маттиас, который немало сделал и в области получения сверхпроводящих материалов. В своем выступлении на первой конференции по проблеме высокотемпературной сверхпроводимости он сказал, что впервые участвует в конференции по несуществующей проблеме.



Многие лаборатории отошли от ранее традиционной для них тематики. Но были ученые, которые оставались верными рыцарями одной из важнейших проблем современной физики.

В 60–70–х годах академик В. Л. Гинзбург с группой сотрудников Физического института имени П. Н. Лебедева

Академии наук СССР провели ряд фундаментальных теоретических исследований в области высокотемпературной сверхпроводимости, на основании которых пришли к глубоко обоснованному выводу о том, что не существует физических законов, которые могли бы помешать созданию сверхпроводников, «работающих» даже при температуре 300К. Ученые наметили основные направления работ в этой области.

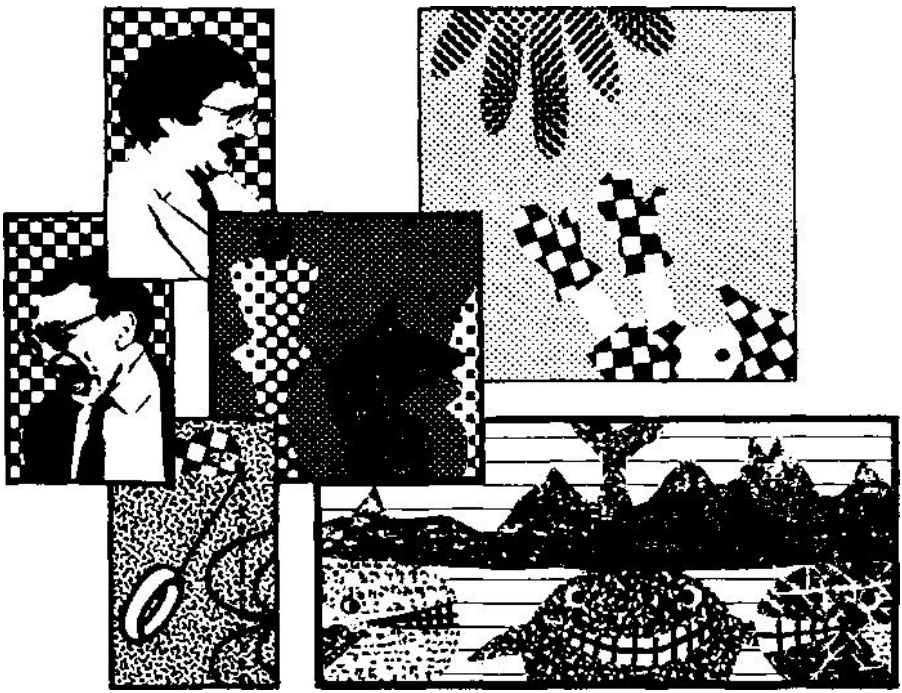
Работы Гинзбурга и его коллег были опубликованы в ряде отечественных и зарубежных научных журналов, обобщены в объемной монографии «Проблема высокотемпературной сверхпроводимости», вышедшей в 1977 году под редакцией В. Л. Гинзбурга и другого известного физика Д. А. Киржница. А в начале 80–х годов был опубликован английский перевод этой книги.

В январском выпуске 1971 года журнала «Успехи физических наук» В. Л. Гинзбург писал, что в области высокотемпературной сверхпроводимости «…быть может, вовсе не нужно проводить какой-то сверхсложный синтез новых веществ и совсем не исключена возможность добиться успеха сравнительно скромными (хотя и современными) средствами. Поэтому я не удивился бы, если бы прочел о создании высокотемпературного сверхпроводника в очередном номере физического журнала (другое дело, что в этом случае, по всей видимости, возникла бы сенсация, и о новостях мы бы узнали из газет или радиопередач)».

Прогноз советского академика сбылся почти буквально.

Открытие высокотемпературного сверхпроводника наконец состоялось, а изготовлен он был из керамики, материала, известного человеку еще с древних времен.

11. «Возвращение каменного века». Ученые из Цюриха начинают «… выигрывают. Магические цифры. Три кита, на которых держится сверхпроводимость.



Слово «керамика» происходит от греческого «керамос», что в переводе означает «глина».

Керамика — один из древнейших материалов, известных на Земле. Первые керамические изделия появились за пять тысячелетий до новой эры, на исходе каменного века.

Пластичность глины была известна людям с незапамятного времени. Человек, который первым до — гадался подвесить изделие, вылепленное из глины, над костром, разумеется, не мог предположить, что изобрел замечательный материал, который впоследствии получит широчайшее распространение. Мягкая и податливая глина под действием огня сделалась твердой как камень. Из керамики (обожженной глины) делали сосуды для приготовления пищи.

…Проходили века и тысячелетия. Костры и простейшие горны сменились механическими печами. Совершенствовались техника обжига и технология производства.

Керамика окружает нас в повседневной жизни: от посуды и домашней утвари до санитарных приборов. Это один из основных материалов в строительстве. Трудно представить, что керамика — это и легкая фаянсовая чашечка и грубый увесистый кирпич.

Современная керамика — не только материал, сформованный из глин с различными добавками. Это также изделия, в состав которых глины вообще не входят. Они состоят из других минеральных масс, подвергаемых обжигу при температуре от 900 °С и выше.

Керамические материалы имеют ряд преимуществ перед металлами. Они выдерживают более высокие температуры, стойкие к действию кислот, и не подвержены коррозии. По прочности керамика почти не уступает алмазу. Удельный вес ее меньше, чем у металлов, и изделия из нее соответственно легче. Сырье для керамики дешево и имеется почти всюду.

Керамический резец, например, легко вгрызается в стальную заготовку. Инструменты из керамики применяются в металлообработке.

Керамические материалы используются на атомных электростанциях, в экспериментальных установках термоядерного синтеза. Керамические покрытия защищают корпуса космических кораблей при входе их в плотные слои атмосферы. Применяется керамика в самолетостроении, приборостроении, электротехнике и других отраслях промышленности.

Вместе с тем керамические материалы отличаются хрупкостью, они чувствительны к изменениям температуры: при резком охлаждении трескаются.

Некоторые специалисты считают, что при усовершенствовании технологии производства керамика сделается одним из основных материалов в технике и промышленности.

К числу восторженных поклонников керамики следует отнести авторов статьи, опубликованной в начале 1987 года в западногерманском научно- популярном журнале «Гео». В этой статье, озаглавленной «Возвращение каменного века», они пишут: «По типу применяемых материалов определенные этапы в истории человечества называются каменным, бронзовым и железным веками. Наше время принято называть атомным веком. Следующая эпоха имеет все основания называться веком керамики».

Многие годы и десятилетия длились поиски высокотемпературных сверхпроводников. А в результате в

фавориты вышел не благородный металл, не солидный сплав с двойной «фамилией» и даже не уроженец далекой планеты — металлический водород, а оксидная керамика, получаемая путем спекания порошков окислов металлов.

Давно известно, что большинство окислов являются прекрасными… изоляторами и, казалось, обнаружить в них сверхпроводимость невозможно.

Швейцарский ученый Карл Алекс Мюллер и западногерманский физик Йоган Георг Беднорц, работающие в исследовательской лаборатории цюрихского филиала известной американской фирмы ИБМ, в течение многих месяцев исследовали разные окислы, варьируя их составляющие и изменяя режимы термообработки. Наконец на исходе 1985 года, сплавив в определенной пропорции окислы бария, лантана и меди, они обнаружили, что у полученного соединения при температуре 30—35К резко падает электрическое сопротивление.

«Похоже, что это начало перехода вещества в сверхпроводящее состояние», — подумали ученые.

Однако они не спешили опубликовывать результаты своих экспериментов. Слишком неправдоподобным выглядел такой скачок критической температуры, сразу на 7—12 кельвинов выше прежнего рекорда.

Сообщение о своем открытии они послали в научный журнал лишь в середине апреля 1986 года.

И вот в сентябрьском номере журнала «Zeitschrift fur Physik B» появилась статья под названием: «Возможная сверхпроводимость в системе барий- лантан — медь — кислород».

Многие физики сдержанно отнеслись к этой публикации. И раньше из разных стран поступали сообщения об открытии сверхпроводников с еще большей критической температурой. К сожалению, попытки повторить эти результаты успеха не имели. Один физик предложил специальный термин: «невоспроизводимые сверхпроводники». И теперь никто не хотел попадать впросак.

Мог ли кто предполагать, что пройдут считанные месяцы и критическая температура керамических сверхпроводников возрастет еще на несколько десятков кельвинов, а их первооткрыватели А. Мюллер и Г. Беднорц будут удостоены Нобелевской премии по физике за 1987 год. Это, пожалуй, единственный случай в практике присуждения нобелевских наград, когда открытие получило столь быстрое признание.

А. Мюллер родился в 1927 году в городе Базеле, в Швейцарии. В 1958 году он окончил знаменитую Федеральную высшую политехническую школу в Цюрихе (Цюрихский политехникум). В 1962 году защитил докторскую диссертацию.

Профессор Мюллер — один из ведущих в мире специалистов по физике твердого тела. В фирме ИБМ он работает уже свыше 25 лет, является членом ее научного совета.

Г. Беднорц значительно моложе своего коллеги. Он родился в 1950 году в небольшом западногерманском городе Нойнкирхине. Высшее образование получил в одном из старейших в стране университете города Мюнстера (ФРГ). В 1982 году защитил докторскую диссертацию в Цюрихском политехникуме и был принят на работу в фирму ИБМ.

Область научных интересов Мюллера и Беднорца совпала. Их первая совместная публикация появилась в 1983 году.

Но наиболее выдающихся научных результатов они достигли не в той области, в которой специализировались. В физике сверхпроводимости они были новичками.

Однако следует ли считать их успех делом случая? В науке все взаимосвязано. Подлинные ученые не ограничивают свои интересы какой-либо узкой областью. К таким разносторонним ученым принадлежит и профессор А. Мюллер.

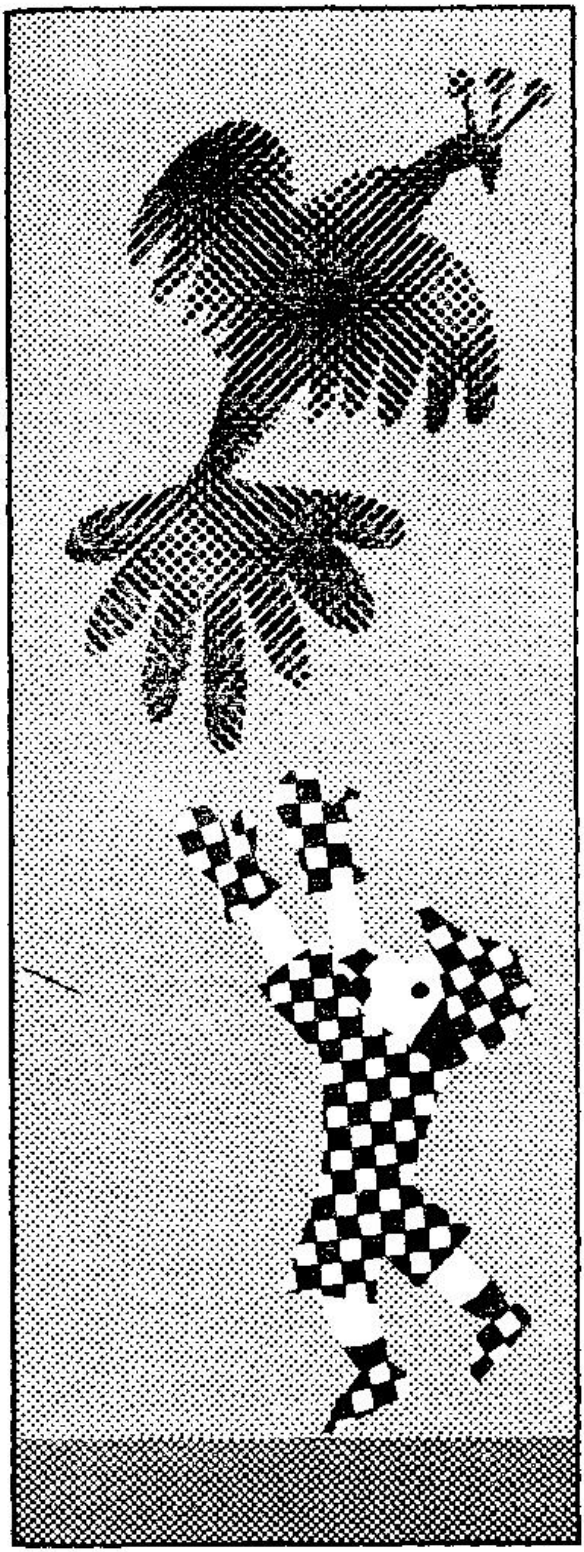
Оксидные соединения исследовались в разных странах начиная с 60–х годов.

В июньском номере за 1979 год «Журнала неорганической химии» была опубликована статья сотрудников Института общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова Академии наук СССР И. С. Шаплыгина, Б. Г. Кахана и В. Б. Лазарева.

Авторы исследовали некоторые оксиды, в том числе барий — лантан — медь — кислород. Обратите внимание: это то же самое соединение, о котором шла речь выше. Ученые проверили его на электрическую проводимость вплоть до азотных температур и… остановились. Можно сказать, они держали в руках жар — птицу и… упустили ее.

…Среди ученых, которые с самого начала отнеслись с доверием к сообщению из Швейцарии, был американский физик Пол Чу, возглавляющий небольшую, скромно оснащенную исследовательскую группу в Хьюстонском университете.

Чу не только воспроизвел результаты физиков из Цюриха, но и пошел дальше.



В хьюстонской лаборатории есть установка для испытания материалов под высоким давлением.

Имея в своем распоряжении такую аппаратуру» Чу решил подвергнуть соединение лантан — барий — медь — кисло — род действию высокого давления.

— Словно произошло чудо, — рассказывал Чу, — температура перехода в сверхпроводящее состояние взвилась, словно ракета.

При давлении 10 тысяч атмосфер она возросла до 52 К.

«Давление срабатывает, — подумал Чу, — по — тому, что оно расщепляет молекулярную структуру вещества, а это каким-то образом поднимает его температуру сверхпроводимости».

Исследователю приходит в голову мысль: «сжать» вещество изнутри, заменив барий стронцием — элементом, схожим с барием, но с меньшей атомной массой.

Опыт увенчался успехом.

Температура сверхпроводящего перехода соединения лантан — стронций — медь — кислород оказалась равной 36К при нормальном атмосферном давлении.

Итак, после многолетних поисков застарелый рекорд 1973 года (23,4К) был превзойден почти на 13 кельвинов.

После такого выдающегося успеха все крупные лаборатории мира, занимающиеся изучением сверхпроводимости, активно включились в поиск и исследование новых металлооксидных сверхпроводников.

В первых главах книги мы рассказали о том, как ученые наперегонки стремились ворваться в область абсолютного нуля температуры.

Теперь перед соревнующимися предстала обратная задача: вырваться подальше из плена гелиевых температур.

И на этот раз, сделав стремительный рывок, вышла вперед группа Чу.

Сначала Чу решил еще сильнее «сжать» исходное вещество, заменив стронций элементом с еще меньшей атомной массой — кальцием.

Но увы! Температура сверхпроводящего перехода упала до 20К.

Казалось, дело зашло в тупик.

Тогда Чу предложил взяться за лантан — редкоземельный компонент соединения.

Мо Куэн Ву, бывший аспирант Чу, возглавляющий часть его группы, которая работала в Ала бамском университете, заменил лантан другим редкоземельным элементом — иттрием.

…Был на исходе январь 1987 года. Мир еще не знал о

событиях, происходящих в те дни в стенах университетской лаборатории в городе Ханствилл, на юге США.

Приготовив образец соединения иттрий — барий- медь — кислород, Ву и его коллеги приступили к испытаниям… К их изумлению, электрическое сопротивление образца начало резко падать при неправдоподобно высокой температуре 93К.

«Мы были так возбуждены и так нервничали, — вспоминает Ву, — что руки у нас тряслись. Сначала мы подозревали, что произошла ошибка».

Повторив через несколько дней эксперимент, Чу и Ву добились перехода вещества в сверхпроводящее состояние еще при более высокой температуре: 98К.

Почти одновременно образцы иттрий — бариевой керамики с температурой перехода в сверхпроводящее состояние около 100К были получены группой А. И. Головашкина в лаборатории сверхпроводимости Физического института имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР, а также в ряде других лабораторий и институтов Советского Союза.

Такие сверхпроводники можно охлаждать жидким азотом (температура его кипения 77К).

Нетрудно представить, насколько проще, дешевле и надежнее сделаются сверхпроводящие устройства, охлаждаемые жидким азотом. Это легкодоступное вещество, извлекаемое почти в буквальном смысле слова из… воздуха. Достаточно сказать, что литр жидкого азота стоит меньше, чем, скажем, литр молока или литр лимонада, а хранить его можно в обычном термосе.

Открытие керамических высокотемпературных сверхпроводников вызвало интерес во всем мире. В промышленно развитых странах возрастающими темпами разворачиваются работы по дальнейшему усовершенствованию высокотемпературных сверхпроводников, созданию новых сверхпроводящих устройств.

Взгляните на график, иллюстрирующий рост критической температуры сверхпроводников в течение календарного времени.

На протяжении многих десятилетий эта кривая медленно, словно нехотя, поднималась вверх.

За период с 1911 по 1986 год, то есть за 75 лет, критическую температуру удалось увеличить всего на 20 кельвинов, то есть прирост составлял в среднем чуть больше четверти кельвина в год. Легко рассчитать, что при дальнейшем продвижении такими темпами исследователи достигли бы рубежа азотных температур где-то в середине XXII века.

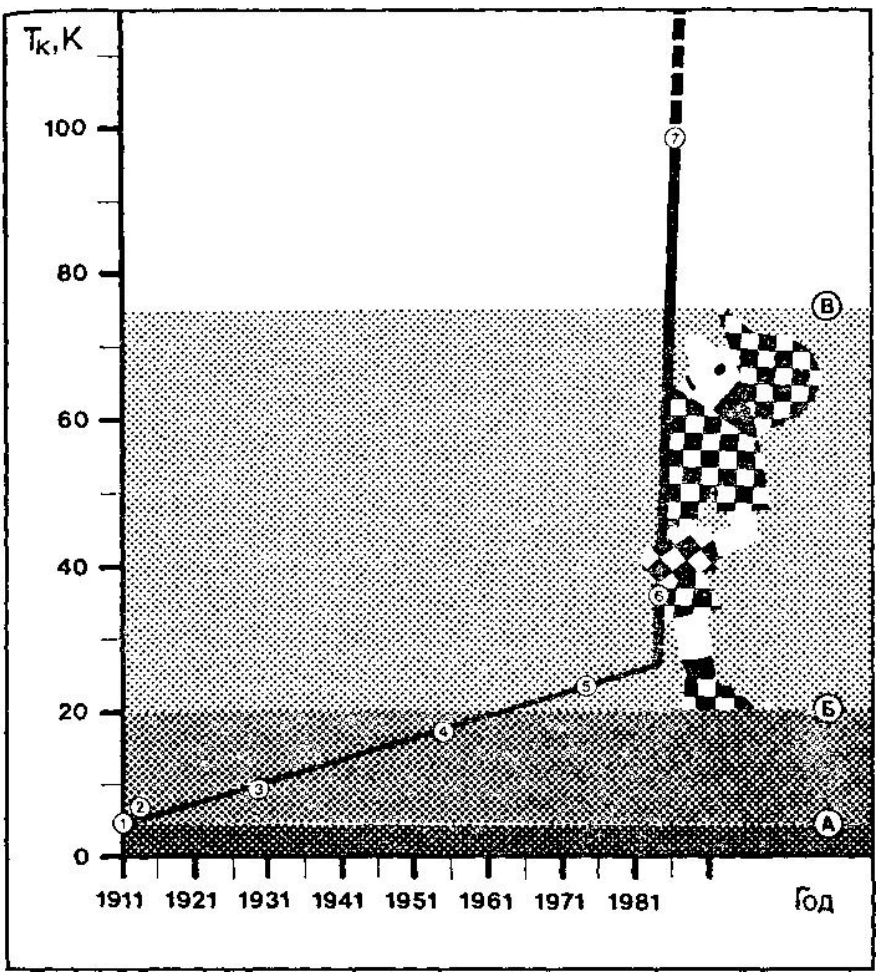
Как в природе, так и в обществе периоды плавного эволюционного развития сменяются революционными скачками.

Революция в области сверхпроводимости произошла в конце 1986—начале 1987 года, когда критическая температура увеличилась скачком на 70 кельвинов (жирный участок кривой на графике).

В дни, когда пишутся эти строки, революция в области сверхпроводимости продолжается.

130… 150… 170… 200… и даже 500 кельвинов… Такие сообщения о достигнутой температуре сверхпроводящего перехода поступают из разных источников.

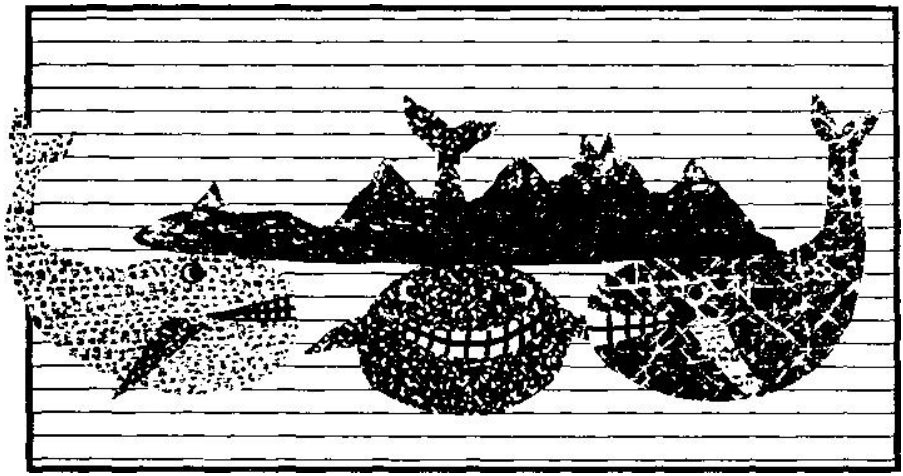
Какие из этих результатов окажутся достаточно достоверными, а кто в пылу «сверхпроводящей лихорадки» принял желаемое за достигнутое, пока сказать трудно.



Трудные ступени критической температуры сверхпроводников: 1— ртуть; 2— свинец; 3— ниобий; 4— ниобий — олово; 5— ниобий — германий; 6— лантан — стронций — медь-кислород; 7— иттрий — барий — медь — кислород. Температура кипения: А —

жидкого гелия, Б — жидкого водорода, В — жидкого азота.

Согласно поверью древних, Земля стоит на трех китах.



Три «кита», на которых держится сверхпроводимость, это — критическая температура, критическое магнитное поле и критический ток.

Варьируя состав керамики иттрий — барий- медь — кислород, исследователи получили соединение, которому присвоили название: фаза «один- два — три», отражающее количественное соотношение его составляющих — иттрия, бария и меди.

Критическая температура этого соединения, в зависимости от способа приготовления образцов и режима их термообработки, лежит в пределах 94—98К, что примерно на 20 кельвинов выше точки кипения жидкого азота.

Рассказывая об истории открытия высокотемпературных сверхпроводников, автор намеренно избегал термина «критическая температура». У первых керамических высокотемпературных сверхпроводников переход в сверхпроводящее состояние был «размыт»: электрическое сопротивление не сразу падало до нуля, а лишь при дополнительном охлаждении на несколько, а порой на десяток кельвинов.

У иттрий — бариевых сверхпроводников состава «один — два — три» при достижении критической тем — пературы электрическое сопротивление почти сразу падает до нуля.

Примечательно, что в данном случае цифры «один — два — три» оказались «магическими».

Все соединения типа иттрий — барий — медь — кисло- род состава «один — два — три», в которых вместо иттрия

последовательно брали редкоземельные элементы: скандий, европий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий и лютеций, являются сверхпроводниками с критической температурой от 85 до 96К.

Еще раз автор напоминает читателю, что при критической температуре критическое магнитное поле и критический ток равны нулю и увеличиваются по мере отхода от критической в сторону более низких температур.

Поэтому особое значение приобретает то обстоятельство, что иттрий — бариевые сверхпроводники можно охлаждать с помощью жидкого азота до температуры на 20К ниже критической. Такой «запас прочности» обеспечивает получение достаточно больших критических магнитных полей и критических токов.

Верхнее критическое магнитное поле иттрий — ба- риевых сверхпроводников достигает 100 тесла, что значительно превышает прежний рекорд 60 тесла, наблюдаемый у одного из соединений на основе сульфидов молибдена. Помните, об этом рассказывалось в шестой главе.

Еще сравнительно недавно исследователей удручало, что критический ток керамических сверхпроводников имеет мизерную величину, значительно меньшую, чем у «классических» сверхпроводников. Плотность критического тока не превышала нескольких ампер на квадратный сантиметр.

Путем усовершенствования технологии изготовления удалось увеличить плотность критического тока иттрий — бариевых сверхпроводников до 10 тысяч ампер на квадратный сантиметр. Иными словами, через стержень сечением в один квадратный сантиметр, охлаждаемый жидким азотом, можно пропускать без каких-либо потерь ток силой десять тысяч ампер.

Значительно большая плотность критического тока получена на керамических сверхпроводящих пленках.

Оригинальный способ синтеза сверхпроводящих пленок методом напыления с помощью лазера разработан в Физическом институте имени П. Н. Лебедева Академии наук СССР. Такая пленка отличается высокой стабильностью, а плотность тока составляет 2,6 миллиона ампер на квадратный сантиметр.

В календаре открытий высокотемпературной сверхпроводимости месяц январь встречается дважды.

В конце января 1987 года был открыт, как читатель, наверное, помнит, иттрий — бариевый высокотемпературный сверхпроводник.

Спустя год, в конце января 1988 года, ученый мир узнал, что открыт новый высокотемпературный сверхпроводник —

висмутовая керамика. Стал известен и ее состав: две части висмута, три части стронция и кальция, две части меди, восемь частей кислорода.

У висмутовой керамики критический ток примерно такой же, как у иттрий — бариевой, но она имеет ряд преимуществ: более стабильна, химически стойкая, менее хрупкая.

Ожидается, что по плотности тока и некоторым другим характеристикам висмутовая керамика превзойдет своих предшественниц. К тому же она дешевле, так как не содержит редкоземельный элемент иттрий, который в десять раз дороже висмута. В лабораториях СССР, Японии, США проводятся интенсивные исследования этого перспективного высокотемпературного сверхпроводника.

Одним из главных препятствий для промышленного применения керамических сверхпроводников является их хрупкость. Но ведь, как читатель уже знает, хрупкостью отличается и сплав ниобий — олово. А сверхпроводящие провода и кабели из него уже не первый год успешно используют в технике и промышленности, даже на таких ответственных участках, как экспериментальные установки термоядерного синтеза.

Но керамические сверхпроводники имеют и свои специфические особенности.

Известно, что одной из составных частей существующих сверхпроводящих проводов является медь. Однако у керамических сверхпроводников «дружба» с медью пока не состоялась: керамика содержит кислород, а медь быстро окисляется.

Чтобы керамику можно было использовать для изготовления проводов и кабелей, предстоит решить нелегкие технологические задачи.

Промышленность уже изготовляет керамические сверхпроводники в виде колец, пластин, цилиндриков.

Процесс изготовления сверхпроводящей керамики достаточно прост.

Смесь порошков — исходных компонентов соединения, тщательно измельченных и перемешанных в нужной пропорции, — прокаливается на воздухе при температуре 950 °С в течение 12 часов. После охлаждения до комнатной температуры будущий сверхпроводник прессуют и придают требуемую форму. Затем еще прокаливают в течение шести часов в атмосфере чистого кислорода и медленно охлаждают.

Недаром один видный советский физик сказал, что керамический сверхпроводник может быть изготовлен даже… на

кухне.

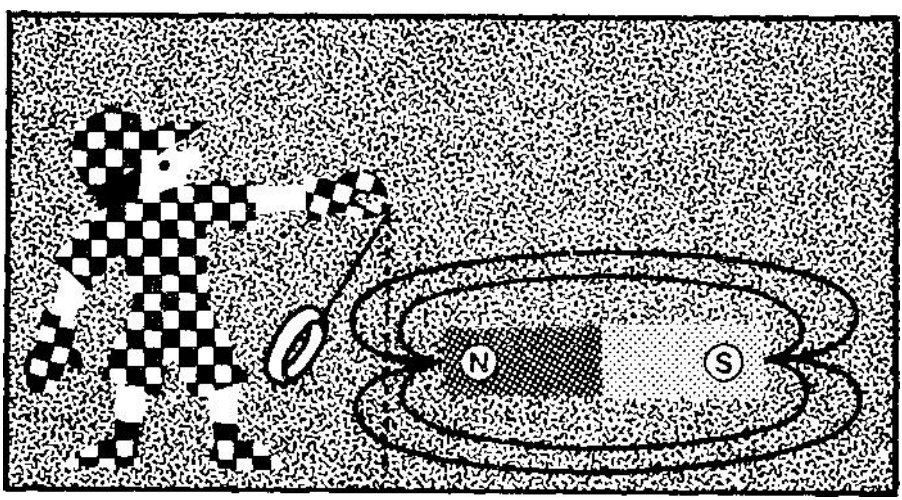
…В четвертой главе книги описан эксперимент, демонстрирующий эффект Мейснера в сверхпроводниках, получивший шуточное название «гроб Магомета».

Не менее наглядный опыт сегодня может быть осуществлен с помощью более простых средств, доступных даже школьному физическому кабинету.

Погрузив подвешенное на ниточке колечко из иттрий — бариевой керамики в сосуд с жидким азотом, а затем удалив охлаждающую среду, вы подносите к колечку постоянный магнит.

Что должно при этом произойти со сверхпроводником, вы, наверное, твердо усвоили, если внимательно прочли четвертую главу книги.

Магнитное поле постоянного магнита индуцирует незатухающий ток на поверхности колечка, который в свою очередь возбуждает магнитное поле.



Колечко иттрий — бариевой керамики, предварительно охлажденное в жидком азоте, отталкивается магнитом.

В результате взаимодействия этих полей возникает сила, которая по закону Ленца стремится от — толкнуть колечко от магнита. И колечко отскакивает от магнита, словно бабочка от огня.

Заметьте, на протяжении демонстрации колечко ничем не охлаждается.

В чем секрет этого «фокуса»?

Время отогревания при комнатной температуре колечка, охлажденного в жидком азоте до критической температуры иттрий — бариевой керамики (то есть от 77К до 94—98К), равно

примерно 30 секундам. Этого времени вполне достаточно, чтобы уверить неискушенного зрителя, будто бы он наблюдал сверхпроводимость при комнатной температуре.

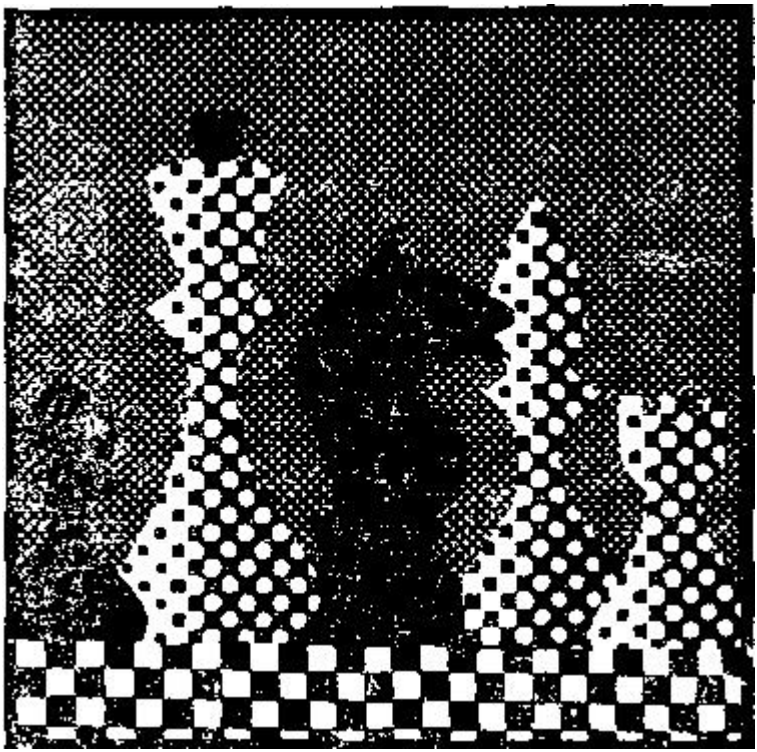
А в самом деле, возможна ли сверхпроводимость при комнатной температуре и какие для этого требуются условия?

Однозначный ответ на этот вопрос наука дать еще не может. К единому мнению о природе высокотемпературной сверхпроводимости керамики ученые не пришли, хотя гипотез, выдвигаемых теоретиками, очень много.

Надежных экспериментальных данных, подтверждающих или отвергающих ту или иную гипотезу, пока не получено. Трудности усугубляются тем, что керамика имеет поликристаллическую, то есть зернистую структуру. Из-за хаотического расположения зерен результаты измерений колеблются от образца к образцу. Правда, советским ученым уже удалось для исследований синтезировать монокристаллы керамики достаточно большой величины.

С момента открытия сверхпроводимости при низких температурах до теоретического обоснования этого явления прошло, как читатель уже знает, почти полвека… В какой срок уложатся на сей раз теоретики, предугадать трудно.

Однако это не удерживает экспериментаторов в их неуемном стремлении к вершинам высокотемпературной сверхпроводимости.

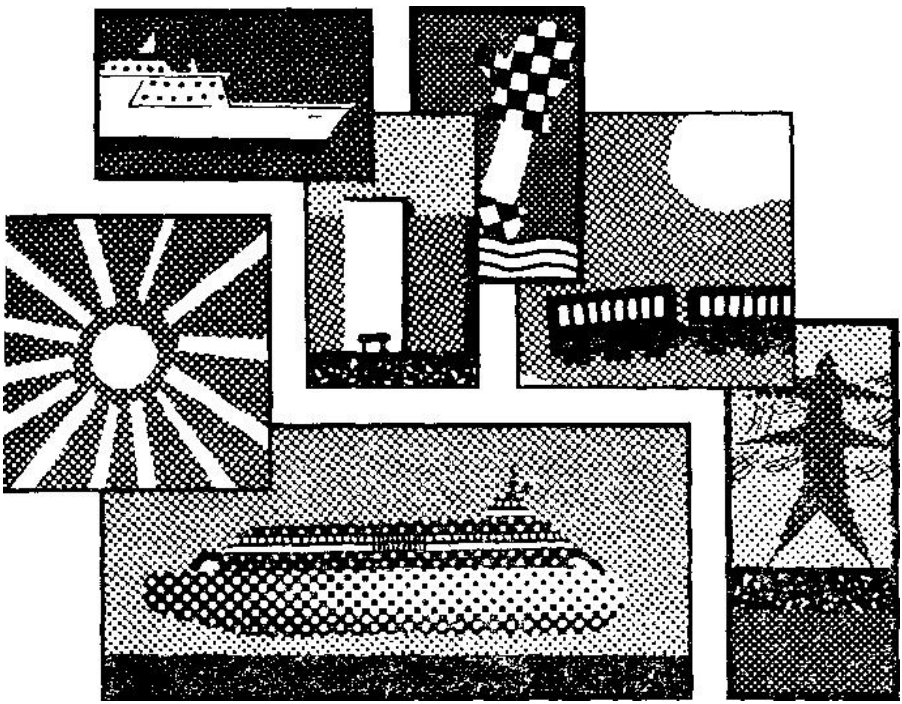


Когда-то один известный физик высказался, правда по другому поводу, примерно так: можно хорошо играть в шахматы, не зная природы материала, из которого изготовлены шахматные фигуры.

Продолжая подобную аналогию, можно сказать, что гроссмейстеры высокотемпературной сверхпроводимости прекрасно разыграли дебют и перешли в миттельшпиль.

Но в отличие от шахматной партии, где время строго ограничено, невозможно предсказать, не обладая даром ясновидения, как будет протекать в дальнейшем «игра» в сверхпроводимость, длящаяся с начала нынешнего века. Однако, несомненно, проигравших в этой «партии» не будет.

12. Ученик чародея. Непокорная плазма. Династия Токамаков. Подземный склад энергии. Необычное озеро. Летающий поезд. Новейший ускоритель



Можно смело утверждать: «кораблю» сверхпроводимости уготовано большое плавание в безбрежном море технического прогресса.

Уже сегодня решение ряда перспективных проблем науки и техники не мыслится без использования сверхпроводимости.

Среди них особенно важны так называемые глобальные проблемы, решение которых имеет существенное значение для судьбы всего человечества.

Глобальной проблемой номер один является энергетическая.

Вся жизнь есть энергия,
Энергия — вечный восторг.

Эти строки английского поэта XVIII века Уильяма Блейка, разумеется, не претендуют на строго научное определение энергии. В них ярко выражена мысль о том, что без энергии вообще немыслима жизнь человека на Земле.

С развитием технического прогресса и ростом народонаселения потребность человечества в энергии непрерывно возрастает.

Ожидается, что к 2000 году потребление энергии на нашей планете возрастет почти в три раза по сравнению с сегодняшним уровнем.

Природные запасы источников энергии не безграничны.

И уже сегодня многие страны находятся под угрозой энергетического кризиса.

С овладением энергией атомного ядра человечество получило новый энергетический источник немыслимой ранее мощности.

По оценке специалистов, природных запасов основного «топлива» атомных электростанций — урана, при его рациональном использовании, хватит человечеству на несколько сотен лет.

Ученые всего мира усиленно работают над следующим этапом использования ядерной энергии — освоением управляемых термоядерных реакций.

В ядерной (атомной) энергетике используются реакции деления тяжелых ядер, при которых ядра делятся на части нейтронами и образуются новые нейтроны.

А в термоядерной энергетике используется противоположный эффект — процесс синтеза ядер легких элементов.

Когда два легких ядра сливаются вместе, происходит так называемая термоядерная реакция.

Термоядерная реакция может происходить только, когда ядра сближаются на расстояние в одну миллионную долю нанометра.

Чтобы состоялось такое сближение, ядра должны преодолеть кулоновские силы отталкивания, то есть обладать большой кинетической энергией. Для этого вещество должно находиться при достаточно высокой температуре, порядка сотен миллионов градусов.

Термоядерные реакции сопровождаются колоссальным выделением энергии. Так, например, энергия, освобождаемая при синтезе всего лишь четырех граммов гелия из водорода, оценивается в 700 тысяч киловатт часов. Это примерно соответствует дневной потребности в энергии для бытовых нужд города с населением в несколько сот тысяч человек.

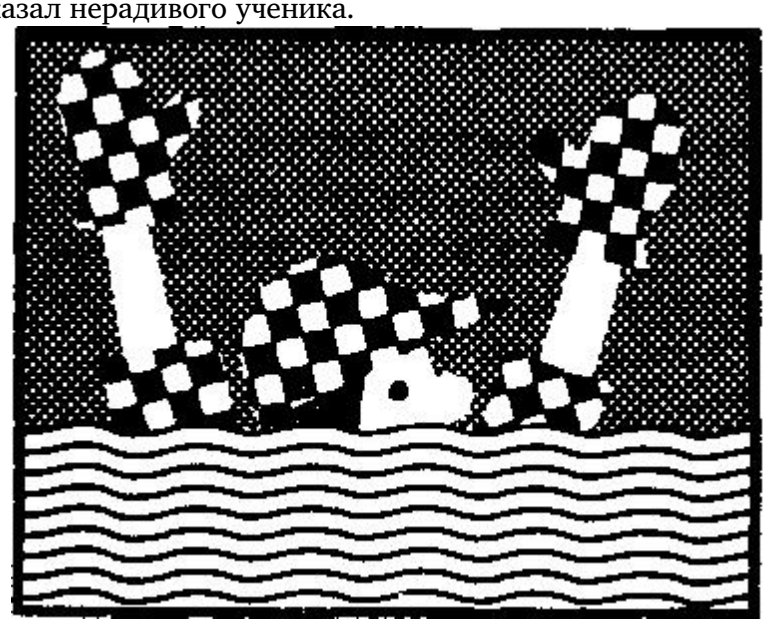
На Земле термоядерные реакции впервые были осуществлены в водородной бомбе.

Нагрев бомбы до температуры в несколько сотен миллионов градусов осуществляется путем взрыва обычной атомной бомбы. Мгновенно выделяющаяся при термоядерной реакции энергия обладает взрывным действием колоссальной разрушающей силы. По мощности взрыва и силе поражающих действий (ударная волна, радиоактивное излучение и т. п.) водородная бомба значительно превосходит атомную бомбу.

Среди произведений Иоганна Вольфганга Гете есть баллада «Ученик чародея».

В этой балладе колдун, отлучившись, оставляет своего ученика на кухне, приказав ему натаскать бочку воды. Мальчик ленив, но достаточно предприимчив: он заставляет выполнить это задание… метлу, произнеся над ней заклинание, подслушанное у своего хозяина.

Метла наполняет бочку водой, но остановить ее ученик чародея не может. Непутевый мальчик почти тонет — он не выучил или забыл другое заклинание, которое остановило бы метлу. В отчаянии он хватает метлу и ломает ее пополам, но с ужасом обнаруживает, что из каждой половины продолжает течь вода. К счастью, он не погиб — появился хозяин, который, произнеся магическое слово, остановил метлу и хорошенько наказал нерадивого ученика.



Так вот, в отношении термоядерных реакций мы в момент, когда пишутся эти строки, находимся на уровне «ученика чародея». Мы можем вызвать термоядерную реакцию, но пока не в состоянии полностью управлять ею, с тем чтобы направить освобождаемую при этом энергию не на разрушение, а на

созидание материальных благ.

Трудности, которые суждено преодолеть ученым на пути к освоению управляемых термоядерных реакций, велики.

Газообразный водород в термоядерном реакторе необходимо не только разогреть до баснословной температуры, исчисляемой сотнями миллионов градусов.

При столь высокой температуре любое вещество превращается в плазму, то есть газ, состоящий практически из «голых» ядер и электронов. Разумеется, такую горячую плазму невозможно удержать ни в одном сосуде. Но поскольку плазма состоит в основном из заряженных частиц, на их траекторию можно воздействовать магнитными полями. Тогда при достаточно сильных магнитных полях и их соответствующей конфигурации представляется возможность, несмотря на высокие скорости частиц, удерживать их в пространстве, в котором может быть осуществлена термоядерная реакция.

Однако плазма — это весьма свободолюбивая «особа». Чем больше ограничивается движение частиц, тем сильнее плазма стремится вырваться из- под опеки, освободиться от удерживающих ее магнитных уз.

В плазме, ограниченной магнитным полем, развиваются колебания и волны, и плазма «просачивается» между силовыми линиями магнитного поля. Магнитное удержание нарушается.

Было предложено немало хитроумных конструкций для удержания плазмы. Из них наиболее удачной оказалась система типа «Токамак».

Слово «Токамак» расшифровывается так: «ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками».

Эта система, предложенная советскими учеными в 50–х годах и впервые осуществленная в СССР, получила признание во всех странах мира, где ведутся работы по управляемым термоядерным реакциям. Сегодня слово «Токамак» одинаково звучит на русском, английском, японском и многих других языках.

Тороидальная камера — это, грубо говоря, гигантский пустотелый бублик. В такую камеру вводится газообразный водород сравнительно небольшой плотности, в ней возбуждается кольцевой электрический ток силой в сотню тысяч ампер.

Внутри тороидальной камеры образуется кольцевой плазменный виток, или, как его называют физики, плазменный шнур. По этому витку течет ток.

Однако такой виток с током сам по себе неустойчив. Для того чтобы его стабилизировать, на поверхности камеры устанавливаются катушки, возбуждающие сильное магнитное поле, силовые линии которого направлены параллельно току в

плазменном шнуре.

«Токамак» для собственных нужд потребляет очень много энергии. Например, для питания экспериментальной установки «Токамак 10» потребовалась подстанция на 180 тысяч киловатт.

Расчеты показывают, что для запуска промышленного термоядерного реактора типа «Токамак» понадобилось бы два миллиона киловатт, то есть мощность Куйбышевской ГЭС.

Существенное уменьшение энергии для питания «Токамаков» достигается при использовании сверхпроводящих магнитов.

В нашей стране была спроектирована и построена первая в мире сверхпроводящая электромагнитная система для установки «Токамак 7». В ней почти вплотную встретились самые низкие и фантастически высокие температуры: в нескольких сантиметрах от охлажденных почти до абсолютного нуля температуры сверхпроводящих витков бушует водородная плазма с температурой в десятки миллионов градусов. На сверхпроводящие катушки действуют электромагнитные силы в сотни тонн, а давление на центральный сердечник превышает 10 тысяч тонн.

Создателям этой системы пришлось решить уникальные по своей сложности инженерные задачи.

Еще более мощной сверхпроводящей электромагнитной системой оснащена новая установка «Токамак 15», которая введена в действие в конце 1988 года. Здесь накапливается магнитная энергия 600 миллионов джоулей, в 50 раз больше, чем в «Токама- ке 7». А по объему плазмы (25 кубических метров) «Токамак 15» превосходит свою предшественницу — установку «Токамак 10» в пять раз.

Одновременно в Советском Союзе проектируется опытный термоядерный реактор. По инициативе советских ученых, под эгидой Международного агентства по использованию атомной энергии (МАГАТЭ), разрабатывается международный проект токамака — реактора ИТЭР, в котором принимают участие ученые СССР, Западной Европы, США и Японии.

Строительство установок типа «Токамак» сегодня стало одним из главных направлений в мировой науке.

Во Франции планируется запустить в ближайшее время токамак «Тор — сюпра», оснащенный, как и наш «Токамак 15», сверхпроводящими магнитами.

В США введен в действие испытательный реактор — токамак ТФТР, на котором впервые достигнута температура плазмы свыше 300 миллионов градусов.

В Калэмской лаборатории, вблизи английского города Оксфорда, запущен токамак «Джет», сооруженный

объединенными усилиями стран — участниц Европейского экономического сообщества. Токамак JT-60 строится в Японии.

С освоением управляемых термоядерных реакций глобальная проблема номер один будет окончательно решена. Человечество будет обеспечено практически неисчерпаемым источником энергии, так как запасы водорода в Мировом океане безграничны.

В отличие от атомных электростанций в процессе работы термоядерного реактора не происходит накопление радиоактивных шлаков.

Рентабельное производство электроэнергии требует строительства все более мощных электростанций вне зависимости от того, какие это станции: атомные, термоядерные, тепловые или гидроэлектростанции.

Мощности строящихся или уже построенных электростанций исчисляются миллиардами ватт.

Электростанции вырабатывают энергию, разумеется, не для собственных нужд. Необходимо эту энергию передать потребителям, расположенным зачастую на больших расстояниях от места ее производства.

Здесь вступает в действие хорошо знакомый нам со школьной скамьи закон Ома. Чем длиннее линия передачи, тем больше ее электрическое сопротивление, а следовательно, тем большая часть выработанной энергии рассеивается, переходит в тепло и не доходит до потребителя.

Значительная часть электрической энергии передается сейчас с помощью воздушных высоковольтных линий. С растущей потребностью в энергии возникает необходимость строительства и новых энергетических сетей. Однако, по крайней мере в густо населенных промышленных районах, уже становится практически невозможным прокладывать все новые воздушные линии.

…Если вы, гуляя за городом, будете проходить мимо воздушной линии электропередачи, то убедитесь, насколько она портит окружающий ландшафт. А сколько урожая недодает нам земля из-за невозможности ее продуктивного использования вблизи высоковольтных трасс, сосчитать трудно!

Казалось, сама природа борется с нарушением ее гармонии. Нередки случаи, когда при обрыве проводов воздушных линий электропередачи в результате бурь и ураганов или их обледенения при сильных морозах селения или даже целые города на длительное время остаются без электроэнергии.

Уже сегодня часть электроэнергии передается по подземным кабелям.

Мысль об использовании для этой цели сверхпроводящих кабелей является весьма заманчивой.

Казалось, проводник без омического сопротивления является идеальным средством для передачи электрической энергии. Но здесь еще в большей степени, чем для сверхпроводящих магнитов, имеет значение экономическая целесообразность. Одно дело — охлаждать до гелиевых температур аппарат, имеющий ограниченный объем, другое дело — поддерживать при температуре вблизи абсолютного нуля линии протяженностью в десятки и сотни километров. При этом через каждые несколько километров необходимо устанавливать станции охлаждения, обеспечивающие непрерывную циркуляцию жидкого гелия, и гарантировать надежность их работы.

Насколько же сверхпроводящий кабель с неотъемлемой от него достаточно сложной системой охлаждения с помощью жидкого гелия является экономичным? Над этими проблемами усиленно работают во многих научно — исследовательских институтах и лабораториях мира.

По мнению советских специалистов, сверхпроводящий кабель, охлаждаемый жидким гелием, целесообразно применять для передачи электрической энергии большой мощности, начиная от двух — трех миллиардов ватт.

Несравненно более широкие перспективы откроются, когда инженеры освоят изготовление сверхпроводящих кабелей, охлаждаемых жидким азотом. Такие кабели способны заменить воздушные линии электропередач.

График суточного потребления энергии похож на рельеф сильно пересеченной местности, где высокие холмы перемежаются глубокими оврагами. Так, например, зимой пик мощности приходится на 6–7 часов вечера, а в 2–3 часа ночи потребление электрической энергии становится мизерным.

Чтобы выпрямить график суточного потребления электрической энергии, всем людям пришлось бы не спать, а предприятиям и учреждениям работать круглосуточно.

Но стоит ли превращать ночь в день, даже в угоду энергетикам?

А что, если при электростанции построить «склад» электрической энергии, подобно тому как существуют склады готовой продукции на промышленном предприятии?

Ночью склад будет пополняться избытком электрической энергии, а днем потребители смогут получать электроэнергию со склада.

Предложено несколько проектов «складов», или, как их называют, накопителей электрической энергии. Пожалуй, наиболее перспективным из них является проект, основанный на использовании сверхпроводимости., Действительно,

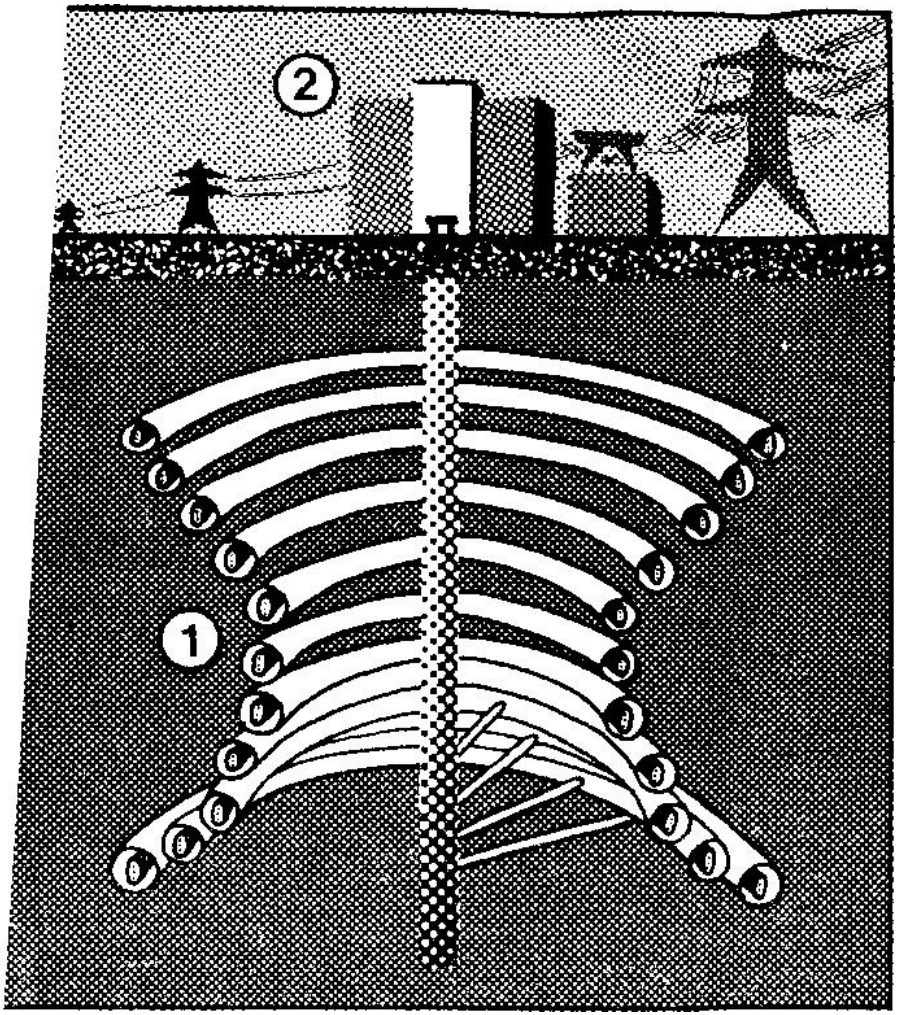
сверхпроводящее кольцо, по которому месяцы и годы непрерывно течет незатухающий электрический ток, чем не идеальное хранилище электрической энергии?

Сверхпроводящий индуктивный накопитель электрической энергии представляет собой, по сути, трансформатор, первичная обмотка которого выполнена из нормального, то есть не сверхпроводящего, провода. Вторичная, сверхпроводящая, обмотка такого трансформатора имеет вид гигантского «бублика» диаметром в несколько сот метров.

Постоянный ток, поступающий в первичную обмотку периодически (циклически), прерывается. В результате в сверхпроводящей обмотке индуцируется незатухающий электрический ток.

Подсчитано, что экономически выгодным может быть индуктивный накопитель с запасом энергии не менее 27 миллиардов ватт — часов.

Эксплуатация такого накопителя требует особо тщательных предосторожностей.



Склад электрической энергии. Проект сверхпроводящего накопителя электрической энергии, разработанный учеными Висконсинского университета (США). Эта установка содержит сообщающиеся каналы (1), в которых находятся сверхпроводники. В них из холодильного устройства (2) накачивается жидкий гелий.

Если обмотка вдруг перейдет из сверхпроводящего в обычное состояние, то циркулирующий в ней ток, силой в сотни тысяч ампер, моментально испарит и ее и всю установку. Это эквивалентно взрыву небольшой атомной бомбы.

Такие установки должны быть расположены глубоко под землей, вдали от городов.

Однако расходы на построение сверхпроводящих накопителей должны окупиться с лихвой.

Американские специалисты подсчитали, что двадцать подобных накопителей дадут возможность уменьшить

капиталовложения в развитие энергетики США на 45 миллиардов долларов.

Резервуар для охлаждения катушки сверхпроводящего накопителя с запасом энергии 27 миллиардов ватт — часов по расчетам должен содержать 600 тысяч кубических метров, то есть, по сути, небольшое озеро жидкого газа.

В одном из проектов сверхпроводящего индуктивного накопителя электрической энергии такое «озеро» предлагается наполнять жидким водородом.

Но почему водородом? Ведь высокотемпературные керамические сверхпроводники можно охлаждать даже жидким азотом.

Водород сам по себе является источником энергии. Это прекрасное топливо для котлов электростанций, двигателей автомашин, тепловозов и самолетов.

Чтобы заменить органическое топливо водородом, его необходимо вырабатывать в больших количествах из морской воды. Предполагается, что это будет осуществляться на атомных, а позже на термоядерных станциях.

Тогда сверхпроводящий накопитель электрической энергии будет одновременно служить складом идеального горючего. Отсюда жидкий водород будет направляться потребителям, «по дороге» охлаждая сверхпроводящие кабели, несущие электрическую энергию.

Развитой промышленности требуются электродвигатели все большей мощности. Увеличивается мощность электрических машин — повышается их сложность, увеличиваются габариты, которые в конце концов превышают разумные пределы. Такие машины становятся, в частности, нетранспортабельными. Для электродвигателей постоянного тока предел мощности в общепринятом конструкторском решении составляет 10 миллионов ватт.

Практически перешагнуть этот барьер можно только при использовании сверхпроводимости.

Сверхпроводящая машина постоянного тока имеет неподвижный индуктор с обмотками возбуждения и вращающийся якорь.

Сверхпроводящие обмотки возбуждения располагаются в неподвижном криостате. В его центральном отверстии вращается «теплый» обычный якорь.

Плотность тока в обмотке сверхпроводящей машины может достигать 1000 ампер на квадратный миллиметр. При таком токе возбуждается достаточно сильное магнитное поле без помощи железа и отпадает надобность в ферромагнитном сердечнике.

Если учесть, что в обычных электрических машинах основную массу составляет железо, то нетрудно себе представить, насколько уменьшаются габариты и масса сверхпроводящей машины. Многие детали машины могут быть изготовлены из… пластмассы.

Малая инерционность и хорошая регулируемость сверхпроводящего электродвигателя постоянного тока создают хорошие перспективы для его применения в качестве привода прокатных станов, больших насосов и вентиляторов на электростанциях, шахтных подъемников и в ряде других отраслей промышленности.

Особенно перспективным является применение сверхпроводящих электрических машин в морском транспорте.

При проектировании электрического привода для кораблей редко удавалось преодолеть трудности, связанные с габаритами и стоимостью. На современных судах мощность на валу нередко превышает 30 миллионов ватт, что намного превосходит возможности обычных двигателей постоянного тока.

Сверхпроводящие машины постоянного тока обладают достаточной мощностью для непосредственного привода винта, а также для приведения в действие всех вспомогательных установок корабля, нуждающихся в электрическом питании. Подсчитано, что применение на танкерах и контейнеровозах сверхпроводящих электродвигателей даст возможность увеличить пространство, занимаемое грузом, на 10–20 %.

А знаете ли вы, что такое магнитогидродинамический генератор, или сокращенно МГД — генератор?

Уже его внешний вид ломает традиционное представление об электрических машинах. В нем нет вращающихся частей.

Принцип действия МГД — генератора заключается вкратце в следующем. Газ нагревается, например, путем сжигания какого-либо горючего до температуры порядка 3000К. Для повышения степени ионизации в газ добавляется небольшое количество щелочных металлов. В результате газ становится электропроводным: он превращается в так называемую низкотемпературную плазму.

Поток такой плазмы пропускается с большой скоростью через канал, помещенный в сильное магнитное поле, которое может создаваться, например, сверхпроводящими магнитами. При этом отклоняемые магнитным полем ионы и электроны создают на специально введенных электродах электрическое напряжение.

Плазма покидает МГД — генератор при относительно высокой температуре. Следовательно, она уносит с собой часть тепла. Для его использования плазма после выхода из канала

МГД — генератора попадает в парогенератор, где ее достаточно высокий запас тепла расходуется для получения пара.

Таким образом, плазма работает как бы дважды: в канале МГД — генератора из нее непосредственно извлекают электрическую энергию, а затем, несколько охладившись и превратившись в обычный неэлектропроводный газ, она отдает оставшееся тепло пару, который вращает турбину и сидящий с ней на валу электрический генератор.

У нас в стране сооружается первый промышленный гидродинамический энергетический блок мощностью 550 миллионов ватт. Он состоит из МГД — генератора мощностью 250 миллионов ватт и стандартной паровой турбины мощностью 300 миллионов ватт.

Главное преимущество МГД — метода преобразования энергии — высокий коэффициент полезного действия. По расчетам специалистов, относительное увеличение коэффициента полезного действия МГД — электростанции по сравнению с тепловой может составить около 25 %.

При сегодняшнем уровне выработки электроэнергии увеличение коэффициента полезного действия тепловых электростанций на такую величину сэкономило бы в нашей стране 75 миллионов тонн топлива (в пересчете на условное) в год или позволило при том же расходе выработать дополнительно 250 миллиардов киловатт — часов энергии.

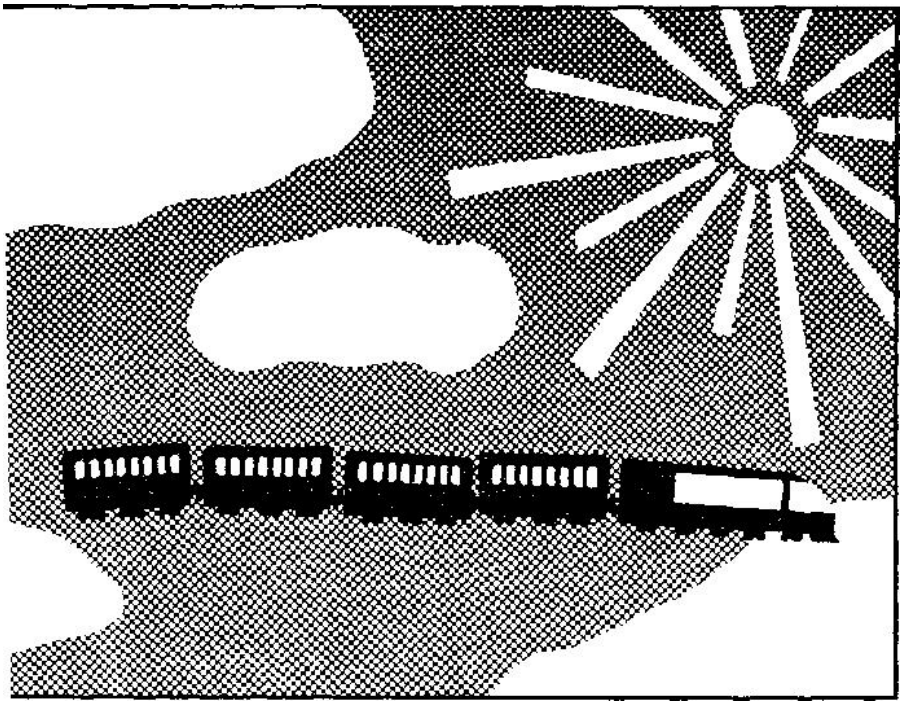
МГД — генераторы со сверхпроводящими магнитами отличаются относительно малой массой. Поэтому их особенно разумно использовать в авиации или при космических полетах.

Читатель, наверное, помнит «гроб Магомета», о котором шла речь в главе четвертой. Такое шутливое название получил проведенный в 1945 году эффектный эксперимент московского профессора с небольшим постоянным магнитом, который парил над сверхпроводящей чашей.

Теперь мы в силах заставить парить в воздухе не только «гроб Магомета», но целый железнодорожный состав.

…В наш век больших скоростей тон задают космические ракеты и сверхзвуковые самолеты. Но и «старушка» железная дорога старается не отставать от требований века. Ведь и сегодня большая часть людей и грузов перевозится железнодорожным транспортом.

Люди старшего поколения помнят время, когда поезд преодолевал расстояние от Москвы до Ленинграда чуть ли не за сутки. Сегодня поезд, отправляющийся из Москвы поздно вечером, прибывает в город на Неве рано утром.



Можно ли увеличивать скорость обычного поезда беспредельно?

С повышением скорости увеличиваются вибрации, обусловленные неровностями пути и колес. При чрезвычайно большой скорости горизонтальные вибрации (рыскание) становятся столь большими, что они могут привести к катастрофе. При чрезмерной скорости вследствие больших вибраций нарушается нормальное функционирование системы подвески контактного провода.

Специалисты считают, что предельная скорость обычного железнодорожного состава не должна превышать 250 километров в час.

Сегодня мы уже подходим к этому пределу. Для того чтобы его перешагнуть, надо оторвать поезд от поверхности земли. А это возможно только с помощью магнитного подвеса, или, как его часто называют, магнитной подушки.

Представьте себе поезд, снабженный рядом сверхпроводящих магнитов, расположенных у основания вагонов. Необычный вид имеет и железнодорожное полотно. Оно содержит множество последовательно расположенных петель из хорошего проводника, например из алюминия.

Когда поезд стоит на месте, не возникает никакого взаимодействия между постоянными магнитами, расположенными в поезде, и железнодорожным полотном. Поезд

необходимо сначала привести в движение и сообщить ему определенную скорость.

В этом смысле поезд на магнитной подушке можно уподобить самолету. Для того чтобы воздушный лайнер мог оторваться от земли, ему надо дать разгон, то есть он должен пробежать определенное расстояние на колесах по земле, как и обычное средство наземного транспорта. Очевидно, по этой аналогии поезд на магнитной подушке называется магнитопланом.

При движении сверхпроводящих магнитов вместе с поездом в проводящих петлях железнодорожного полотна возбуждаются вихревые токи, которые по правилу Ленца создают магнитное поле, направленное навстречу вызвавшему их полю сверхпроводящих магнитов поезда. Это поле создает силу отталкивания, или подъемную силу, и поезд отрывается от земли.

Какая же сила заставляет его устремиться вперед с немыслимой ранее скоростью?

На первый взгляд может показаться логичным использовать с этой целью реактивный двигатель, как в современных самолетах. Но эти двигатели слишком шумные, и, кроме того, они вызывают загрязнение окружающей среды.

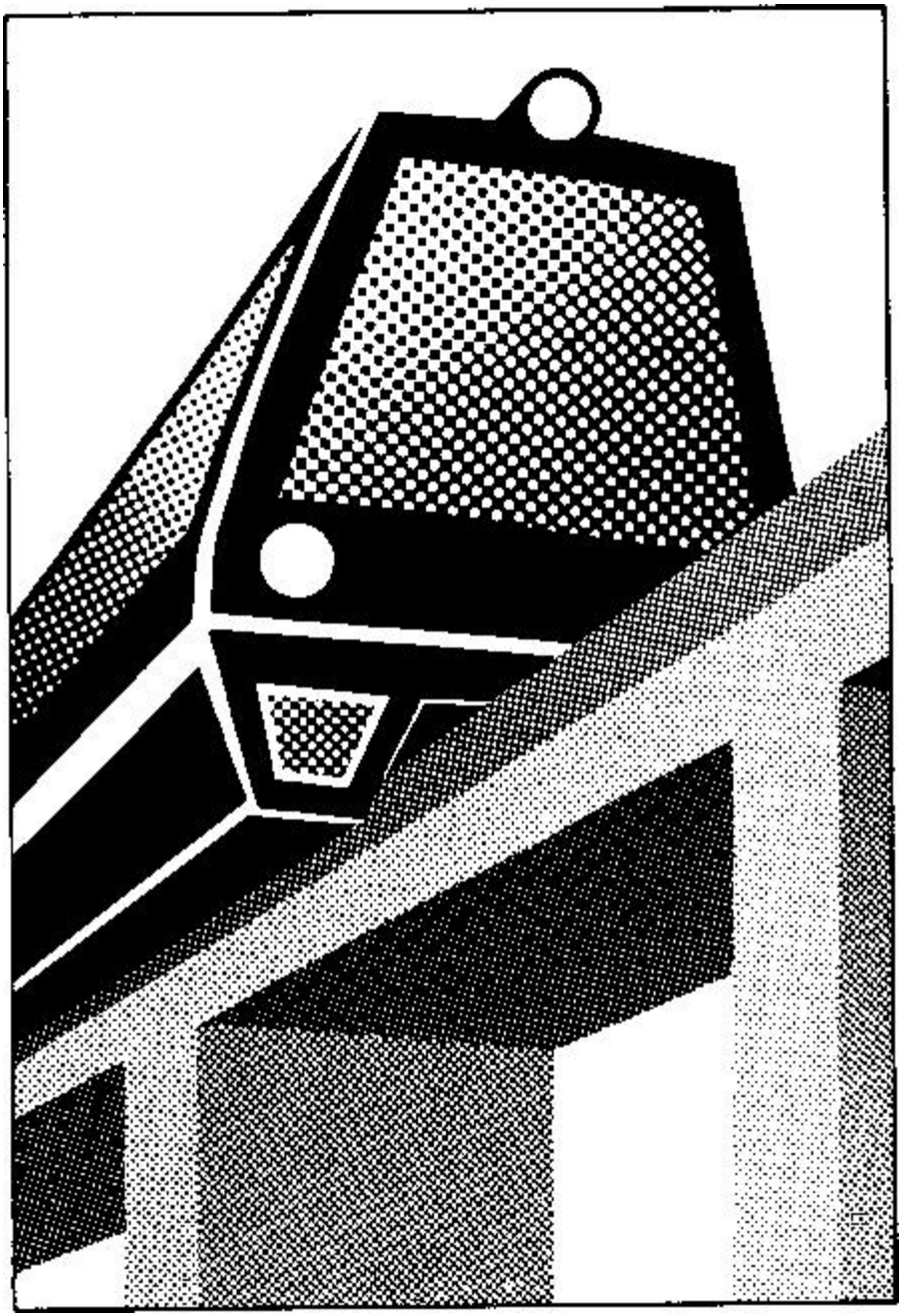
Значит, электрический двигатель?

Как известно, любой электродвигатель состоит из двух основных частей: неподвижной — статора и подвижной — ротора. Мы привыкли к тому, что обе части составляют единое целое.

Иное дело линейный электродвигатель магнитоплана. Он как бы состоит из двух самостоятельных, пространственно разделенных частей. Статор находится на земле, а ротор в «парящем» над землей поезде. В статоре возбуждается электромагнитная волна, которая увлекает за собой магнитоплан.

Магниты выполняют двойную функцию: как средство подвеса и средство тяги. При этом отпадает необходимость подводить электрическую энергию к движущемуся поезду извне с помощью контактного провода, что, как читатель уже знает, является одной из причин, ограничивающей скорость движения обычного поезда.

По сообщениям иностранной прессы, в Японии создан магнитоплан Малев (магнитная «левитация»), развивающий скорость 517 километров в час.



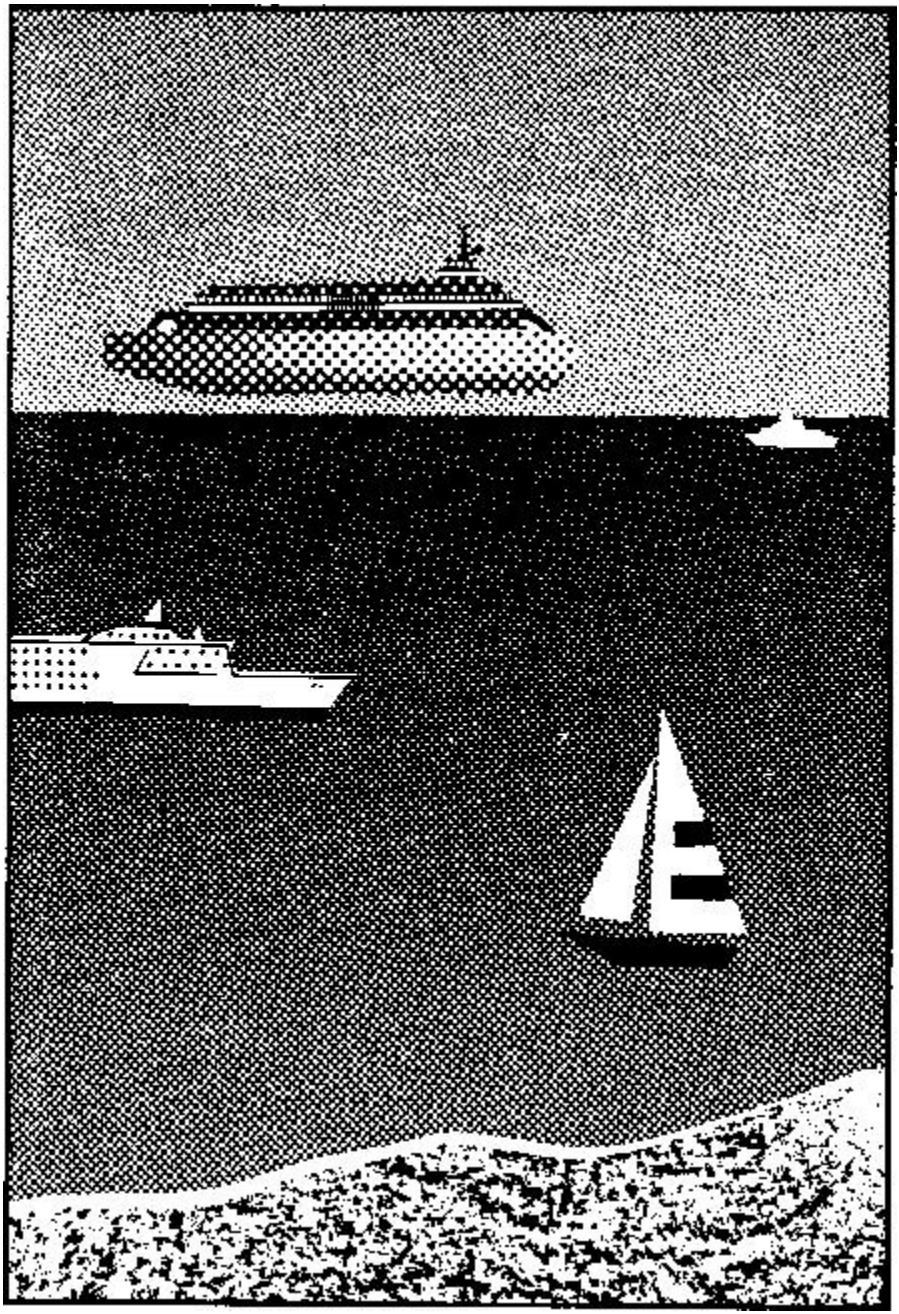
Примерно на таком же принципе, как магнитоплан, основан разработанный в Японии проект магнитного судна.

Представьте себе сверхпроводящий магнит, установленный на борту корабля, создающий мощное магнитное поле. С помощью электродов, установленных под дном судна, соединенных с бортовым источником электричества, через воду пропускается электрический ток. Электромагнитное поле,

порождаемое током, отталкивается от поля магнита, и судно отрывается от поверхности воды.

Действующая модель магнитного судна разработана в Университете торгового флота в Кобе. Японские специалисты надеются построить 100–тонное магнитосудно уже в ближайшие годы.

Другой проект сверхскоростного судна с использованием эффекта сверхпроводимости утвержден Японской ассоциацией содействия судостроению. В начале 90–х годов предполагается отправить в морское плавание экспериментальное судно «Ямато-1» водоизмещением 150 тонн. Два движителя, установленные в днище этого корабля, будут забирать морскую воду и с силой выталкивать ее, используя мощное магнитное поле, возбуждаемое сверхпроводящими магнитами.



Один из научно — фантастических рассказов Г. Уэллса называется «Новейший ускоритель». Однако вряд ли писатель мог предполагать, что пройдет несколько десятилетий и термин «ускоритель» прочно утвердится в науке и технике.

В современной технике под названием «ускоритель» подразумевается ускоритель заряженных частиц — установка для получения пучков электронов, протонов и других заряженных

частиц с большой энергией, являющаяся незаменимым аппаратом для различного рода исследований в ядерной физике, физике элементарных частиц, получения новых, так называемых трансурановых элементов и т; п.

Ускорители заряженных частиц находят применение и в технике: в металлургии для выявления дефектов в толстых металлических изделиях, в пищевой промышленности для стерилизации пищевых продуктов, в медицине для глубинной терапии злокачественных опухолей.

Современные мощные ускорители заряженных частиц — это крупные инженерные сооружения, основанные на последних достижениях науки и техники. По действующим ускорителям сейчас нередко судят об уровне развития техники в той или иной стране.

Для защиты окружающей среды от излучений, возникающих в процессе работы мощного ускорителя, его обычно помещают глубоко под землей.

Для размещения протонного ускорителя диаметром 2,2 километра с длиной окружности 7 километров, запущенного в 1975 году в Женеве, пришлось прорубить туннель в коренной породе на глубине 50 метров под землей. Ширина туннеля всего 4 метра, и он повторяет конфигурацию ускорителя с точностью до нескольких сантиметров.

При строительстве туннелей для железных и шоссейных дорог инженеров обычно удовлетворяет проект, если участки с разных сторон горы сходятся с точностью одного — двух метров. Здесь же требовалось обеспечить правильную проходку по всей семикилометровой окружности с погрешностью всего в несколько сантиметров.

В настоящее время в нашей стране проектируется уникальный ускоритель протонов диаметром 6 километров, с длиной окружности 20 километров.

В ускорителе заряженные частицы с высокими энергиями удерживаются на определенных траекториях с помощью магнитных полей. Эта задача решается тем проще, чем сильнее магнитное поле.

При заданной энергии частиц путем увеличения напряженности магнитного поля можно уменьшить диаметр кольцевых ускорителей, чтобы сократить их габариты. И наоборот, при том же диаметре увеличения магнитного поля можно повысить энергию частиц.

Вот почему новые большие кольцевые ускорители проектируются с использованием сверхпроводящих магнитов.

Приведенными примерами далеко не исчерпываются

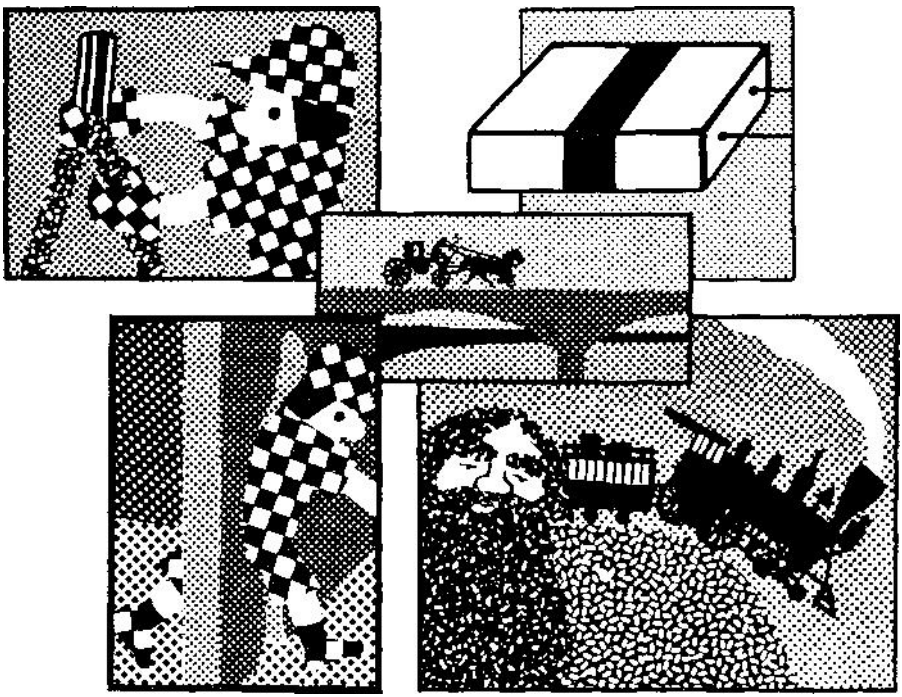
возможности использования сверхпроводящих устройств в технике и промышленности.

Специалисты выдвигают новые проекты, активно обсуждают вопрос о разработке сверхпроводящих электродвигателей для автомашин.

Идея электрического автомобиля не нова. Но долгое время она казалась далекой от реальности. Ведь для питания обычных электродвигателей на каждой автомашине пришлось бы установить собственную «электростанцию». Обмотки сверхпроводящего электродвигателя достаточно зарядить один раз и… навсегда.

Насколько чище сделается окружающий нас воздух, если его не будут загрязнять выхлопные газы современных автомашин.

13. «Разумный» сверхпроводник. Сквозь глухую стенку. Сюрпризы туннельного контакта. Вверх по шкале точности. Необычные воздухоплаватели.



До сих пор в нашем рассказе о практическом применении сверхпроводимости преимущественно фигурировали большие числа. Мощность исчислялась миллионами и миллиардами киловатт, сила тока — десятками тысяч ампер, расстояния — сотнями километров…

Образно говоря, сверхпроводящее устройство нетрудно себе представить как некоего сказочного великана, способного легко взвалить себе на плечи целый железнодорожный состав. Но может ли наш гигант мыслить?

Можно ли построить электронно — вычислительную машину (компьютер) на сверхпроводниках?

Обычно мы пользуемся десятичной системой счисления, содержащей, как следует из ее названия, десять знаков от 0 до 9. Для проведения самых сложных вычислений в компьютере используется двоичная система счисления.

В десятичной системе можно непосредственно изображать

числа до девяти. Для того чтобы представить число десять, мы вынуждены прибегнуть к своеобразной хитрости, перевести единицу в следующий разряд: пишем 10. Для изображения числа сто единица переводится еще на один разряд выше: пишем 100 и т. п.

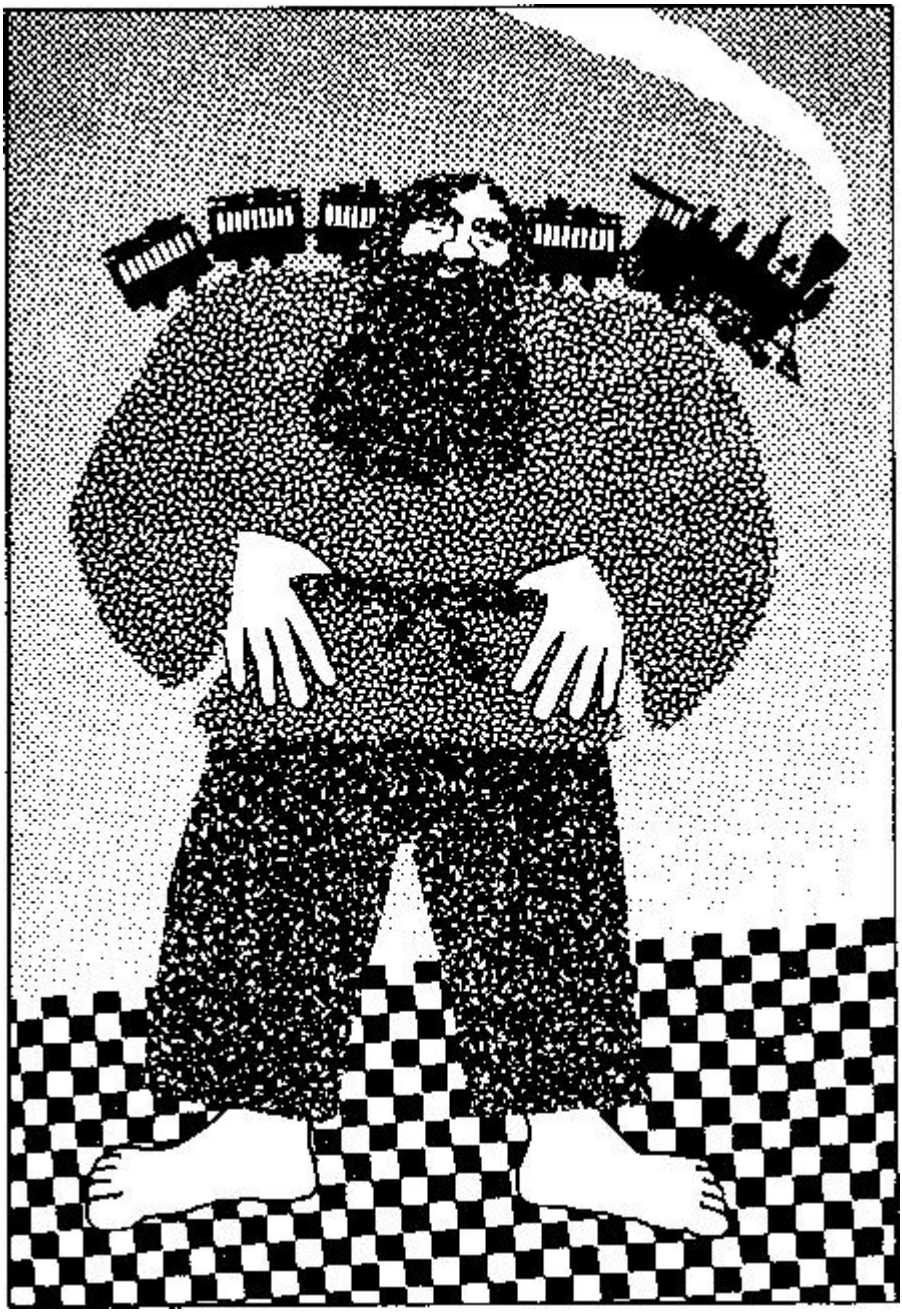
В двоичной системе счисления имеются только два знака: 0 и 1. В этой системе счисления каждый новый разряд увеличивает число не в 10 раз, как в десятичной системе, а лишь в 2 раза. Поэтому для изображения числа два приходится перевести единицу в следующий разряд: пишем 10. Мы пишем 100 для изображения числа четыре, для представления числа восемь пишем 1000, и т. п.

В двоичной системе счисления все арифметические операции выполняются особенно просто: например, вся таблица умножения сводится всего к одному равенству: 1 X 1 = 1.

Неудобство этой системы заключается в громоздкости записи.

Мы предлагаем читателю, в качестве упражнения, изобразить в двоичной системе число 9000. Подскажем, что для этого придется написать четырнадцать знаков!

Манипулировать вручную с таким большим количеством знаков, какими бы простыми они ни были, разумеется, чрезвычайно сложно.



Так почему же компьютер все-таки «предпочитает» двоичную систему счисления?

Потому что она легче всего воспроизводится машиной.

Например, отключенному реле можно приписать состояние «0», а включенному реле «1»; отсутствие сигнала на выходе электронной схемы — «0», наличие сигнала «1» и т. п. А громоздкость подобной записи компенсируется быстродействием

компьютера.

Двоичная информация легко «укладывается» в памяти компьютера. Из двоичных элементов собираются схемы для выполнения логических операций.

Сам принцип использования сверхпроводимости для воспроизведения и запоминания двоичной информации понять нетрудно.

Представьте себе сверхпроводящий контур, в котором протекает незатухающий ток. В зависимости от направления незатухающему току можно приписать информацию «О» или «1». Можно эту информацию приписать и другим состояниям контура: с током «1», без тока «О». А поскольку незатухающий ток может протекать по сверхпроводящему кольцу неограниченное время, то этим определяется способность сверхпроводника долговременно запоминать информацию.

Простейшим («разумным») сверхпроводящим элементом является криотрон, предложенный в 1956 году американским ученым Д. Беком. Он содержит короткий отрезок проволоки из сверхпроводника, обладающего относительно небольшой величиной критического магнитного поля, называемый вентилем. Поверх вентиля навивается однослойная обмотка также из сверхпроводящей проволоки, но изготовленная из металла, обладающего большим значением критического магнитного поля, так называемая управляющая обмотка. Эта обмотка служит для создания магнитного поля, разрушающего сверхпроводимость вентиля.

Пока в управляющей обмотке тока нет, вентиль находится в сверхпроводящем состоянии. Если через управляющую обмотку протекает ток достаточной величины, то возбуждаемое им магнитное поле разрушает сверхпроводимость вентиля. Таким образом, вентиль в зависимости от величины тока в управляющей обмотке либо будет обладать электрическим сопротивлением, либо не будет. Управляющая обмотка все время находится в сверхпроводящем состоянии, так как магнитное поле, достаточное для разрушения сверхпроводимости вентиля, является надостаточным для срыва сверхпроводимости управляющей обмотки.

Один из основных недостатков проволочного криотрона — сравнительно большое время переключения из одного положения в другое: порядка десятитысячных долей секунды.

Когда стало ясно, что такая скорость слишком мала для современных электронных вычислительных машин, разработчики решили заменить проволоки тонкими пленками.

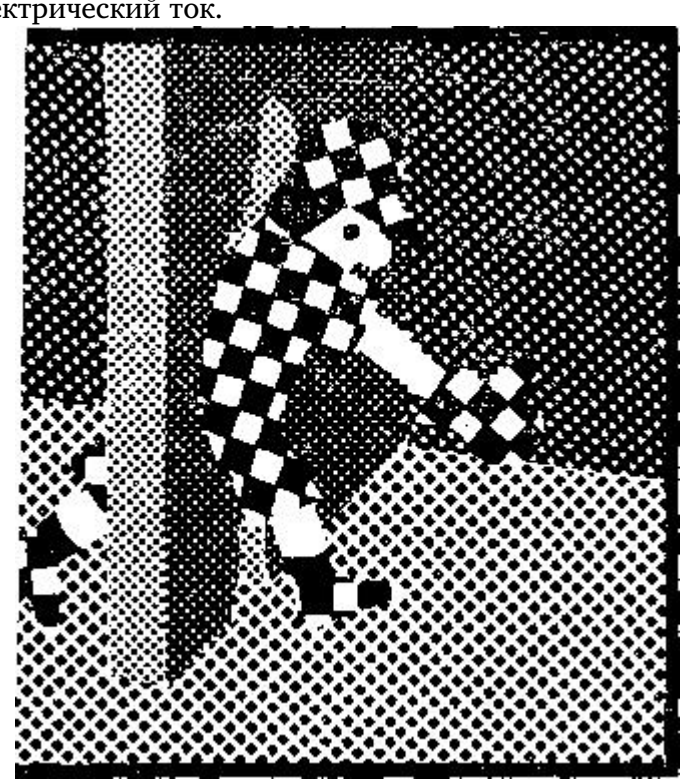
Появился пленочный криотрон. Он состоит из двух пленок,

расположенных достаточно близко друг от друга (обычно одна над другой): вентильной и управляющей. Принцип работы прибора остался неизменным, но действовать он стал значительно быстрее: время переключения уменьшилось до 10 наносекунд (одна наносекунда равна одной миллиардной доли секунды).

На усовершенствование криотронов было затрачено много усилий. Но к середине 60–х годов исследователи убедились, что пленочные криотроны по своим характеристикам уступают разработанным к тому времени лучшим образцам транзисторов, работающим при комнатной температуре.

Начиная примерно с 60–х годов в книгах и монографиях, посвященных сверхпроводимости, появилось новое имя: Джозефсон. Этот молодой, тогда еще мало известный английский физик сразу приобрел популярность. В науку вошло понятие: эффект Джозефсона.

Представьте себе две пленки из металлов, разделенные слоем изолятора. В такой системе электроны обоих металлов отделены друг от друга как бы глухой стенкой: изолятор ведь не пропускает электрический ток.

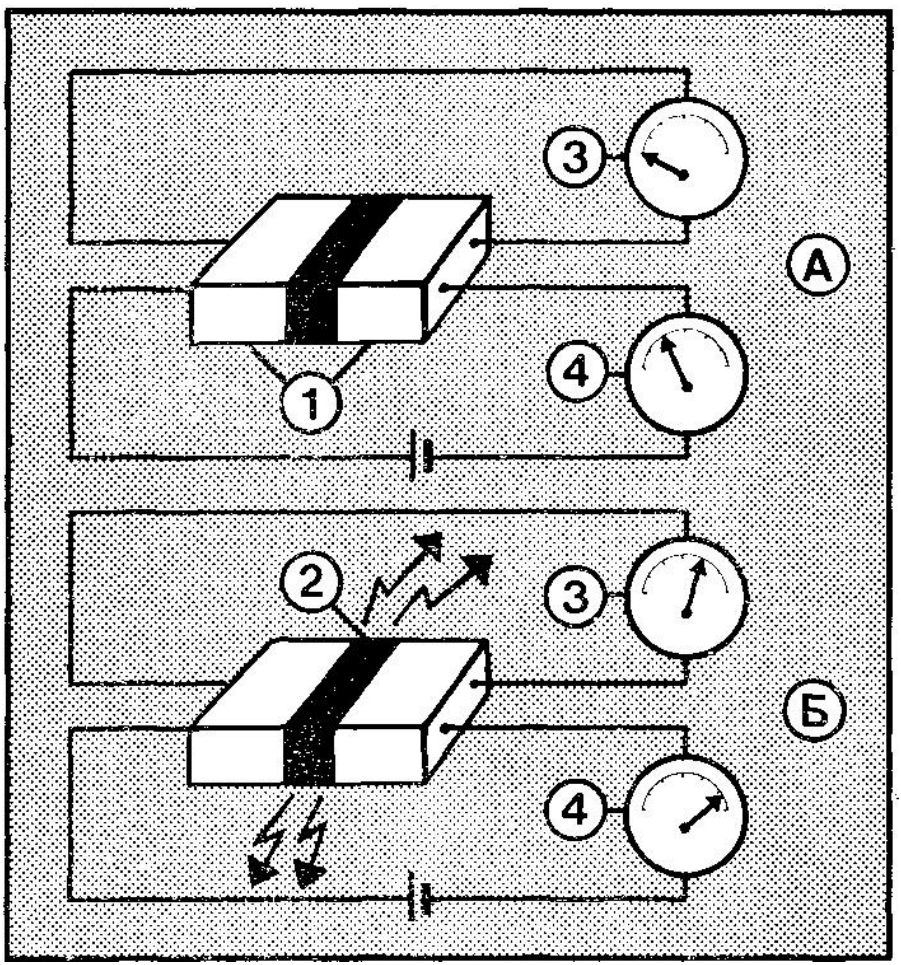


Но оказывается, что при определенных условиях электрон может проходить и через «глухую стену». Это позволяют законы квантовой механики, которые, как мы не раз уже убеждались,

весьма отличаются от законов, управляющих движением больших тел. Если изоляционный слой достаточно тонкий (его толщина не должна превышать нескольких нанометров), то при подключении пленок к полюсам электрической батареи в цепи возникает слабый электрический ток. Такой контакт между металлами — получил название туннельного.

Особо интересные явления наблюдаются, если туннельный контакт состоит из двух сверхпроводников.

Тогда при прохождении через контакт тока, величина которого не превышает некоторое критическое значение, на контакте падения напряжения не возникает: в цепи протекает незатухающий постоянный электрический ток. Это явление получило название стационарного эффекта Джозефсона.



Эффект Джозефсона: 1 — сверхпроводник; 2 — изолятор; 3 — вольтметр; 4 — амперметр. А — при прохождении через туннельный контакт сверхпроводящего тока, величина которого

меньше критического, напряжение на контакте равно нулю. В цепи протекает незатухающий ток. Б — при прохождении через туннельный контакт тока, величина которого больше критического, на контакте возникает падение напряжения, и происходит излучение электромагнитных волн.

Если же величина тока превышает критическую, то на контакте возникает падение напряжения. При этом наблюдается излучение электромагнитных волн. Иными словами, при постоянной разности потенциалов возбуждается переменный ток. Это так называемый нестационарный эффект Джозефсона.

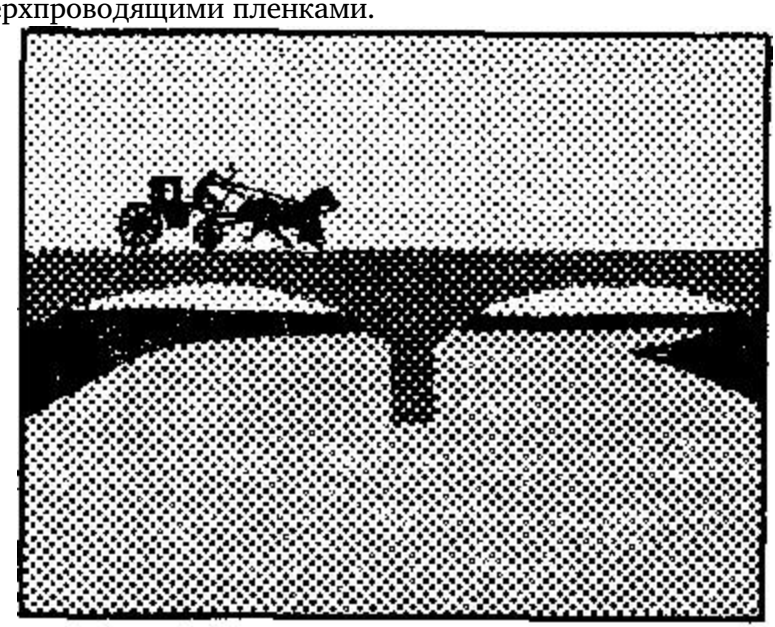
Эффект Джозефсона наблюдается также, если разделить два сверхпроводника слоем нормального, то есть не сверхпроводящего, металла. В этом случае «стенка» может быть сравнительно «толстой» — в десятки и сотни нанометров.

Существуют и другие способы создания контактов, в которых проявляется эффект Джозефсона.

Вот некоторые из них.

Проволоку из сверхпроводника, например ниобия, заостряют, а затем острие прижимается к куску ниобия. Получается так называемый точечный сверхпроводящий контакт.

Между двумя сверхпроводниками можно проложить своеобразный «мост» — микроскопическое сужение (его площадь равна примерно одному квадратному микрометру) между двумя сверхпроводящими пленками.



Это соединение так и называется мостиковым контактом.

Общим для всех перечисленных систем является наличие

«слабого» звена или, иными словами, слабой связи между двумя сверхпроводниками. Поэтому они получили название слабо связанных сверхпроводников.

Примечательно, что двадцатидвухлетний студент Кембриджского университета Брийан Джозефсон открыл в 1962 году эффект, названный его именем: он его вычислил на основании теории сверхпроводимости.

В 1963 году американские физики П. Андерсон и Дж. Роуэл экспериментально доказали наличие стационарного эффекта Джозефсона. А в 1965 году харьковские ученые И. К. Янсон, В. М. Свистунов и И. М. Дмитренко впервые обнаружили электромагнитное излучение, возбуждаемое при появлении напряжения на контакте Джозефсона.

За свое открытие Джозефсон был удостоен Нобелевской премии.

Напомним, что при прохождении через джозеф- соновский контакт тока, величина которого меньше критической, падение напряжения на переходе равно нулю. Если же величина тока превышает критическую, то на переходе возникает падение напряжения.

Значит, элемент Джозефсона имеет два устойчивых состояния: наличие и отсутствие напряжения.

В криотронах Джозефсона, созданных на основе слабой связи, время переключения равно сотым долям наносекунды, что в тысячу раз меньше, чем у пленочных криотронов. Энергия, затрачиваемая на единичное переключение, чрезвычайно мала. Чтобы выразить ее в долях джоуля, пришлось бы после запятой перед первой значащей цифрой написать семнадцать нулей.

Математики в таких случаях применяют сокращенную запись, используя отрицательную степень. Итак, энергия, затрачиваемая на единичное переключение криотрона Джозефсона, равна 10^{-18} джоулей! При этом на площади в один квадратный сантиметр могут быть размещены свыше тысячи элементов.

Все эти качества слабых сверхпроводников открывают прекрасные перспективы в области разработки новых поколений компьютеров, отличающихся компактностью и быстродействием.

В последнее время в руководствах и справочниках по измерительной технике все чаще можно встретить загадочное для непосвященных слово: сквид.

Что такое сквид?

Это название произошло из начальных букв английских слов SQID (Superconducting Quantum Interference Device), что в переводе на русский язык значит: сверхпроводящее квантовое интерференционное устройство.

Сами квантовые свойства сверхпроводящего состояния были известны задолго до открытия эффекта Джозефсона.

Создание приборов, в которых используется это явление, оказалось возможным лишь после открытия слабой сверхпроводимости.

Представьте себе, что обычный сверхпроводящий контур, не содержащий туннельного контакта, находится во внешнем магнитном поле. При изменении внешнего магнитного потока сверхпроводящий ток в контуре изменяется так, чтобы магнитный поток, создаваемый этим током, компенсировал изменение внешнего магнитного потока. Таким образом, суммарный магнитный поток, пронизывающий площадь сверхпроводящего контура, все время остается постоянным. Изменить его, не переводя контур из сверхпроводящего в нормальное состояние, невозможно. Поэтому говорят, что магнитный поток «заморожен» в сверхпроводящем контуре.

Если же включить в сверхпроводящий контур контакт Джозефсона, то внешний магнитный поток использует это «слабое место» и будет внедряться в сверхпроводящий контур отдельными порциями — квантами.

При этом магнитный поток внутри сверхпроводящего контура изменяется скачкообразно на очень маленькую величину (напомним, что один квант магнитного потока равен двум десятимиллионным гаусса на квадратный сантиметр). Однако скорость изменения этого потока чрезвычайно велика. Ее можно измерить, например, по величине электродвижущей силы индукции, наведенной в специальной измерительной катушке.

Прибор, содержащий такой контур, очень тонко чувствует магнитное поле. Контакты Джозефсона включаются в контур параллельно. Происходит своеобразная интерференция сверхпроводящих токов, способствующая феноменально большому увеличению чувствительности прибора.

Сверхпроводящие квантовые интерференционные магнитометры способны измерять поля с точностью до 10^{-16} тесла. Они значительно чувствительнее обычных магнитометров.

В геофизике сверхпроводящие магнитометры используются для исследования магнитного поля Земли. Геологам они оказывают неоценимую помощь при разведке месторождений полезных ископаемых. Они незаменимы, когда приходится вести научные исследования с очень слабыми магнитными полями.

Имеются данные, что магнитное поле вдоль линий разломов земной поверхности изменяется за несколько дней до начала землетрясения. Возможно, что сквиды будут использовать для предсказания землетрясений.

Прекрасным прибором для регистрации излучения в инфракрасной части спектра является сверхпроводящий болометр. Он содержит тонкую проволоку или фольгу из сверхпроводящего материала. Температура проволоки ниже критической. Вследствие поглощения излучения температура повышается и становится больше критической. Сверхпроводимость разрушается, и в проволоке скачком восстанавливается нормальное сопротивление. Возникающее при этом падение напряжения на проволоке измеряется с помощью потенциометра.

Резкость перехода в нормальное состояние делает сверхпроводящий болометр весьма чувствительным прибором. С его помощью удается измерять мощность до триллионных долей ватта. Такой прибор чувствует тепло, излучаемое пламенем свечи, находящейся на расстоянии в один километр!

Успехи в разработке сквидов, достигнутые за последние десятилетия, способствовали созданию новой области магнитных измерений, например биомагнетизма, изучающего слабые магнитные поля, возникающие в биологических объектах — и в первую очередь в человеческом организме.

Электрические методы измерений уже давно применяются в медицине для контроля работы сердца и других органов человека. Использование в этой области магнитных методов стало возможным, когда появился высокочувствительный детектор магнитного поля — сквид.

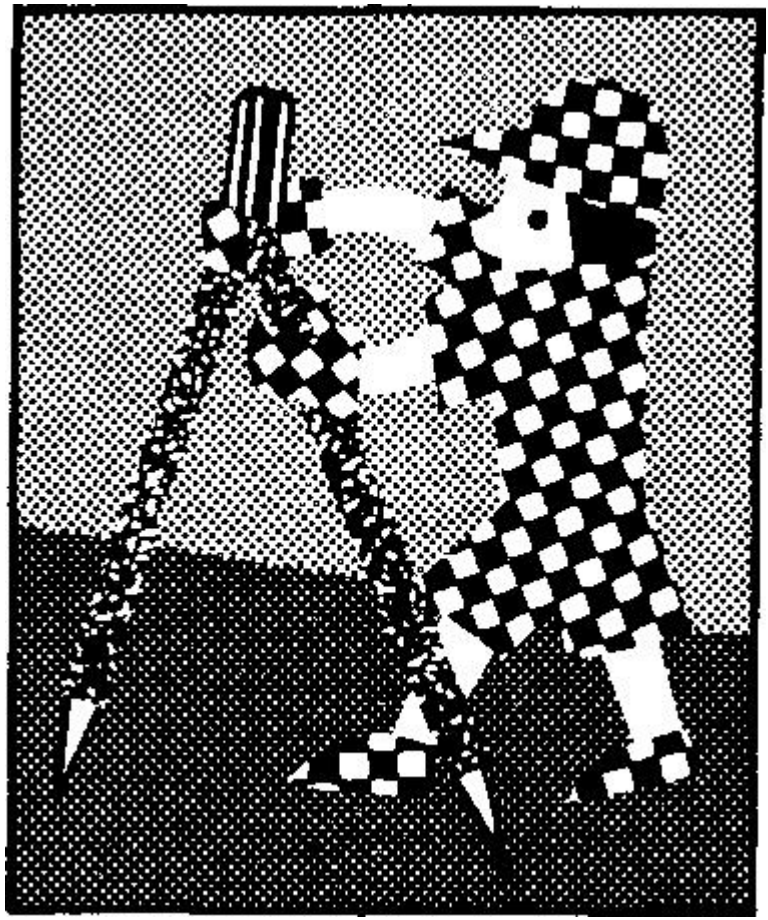
Преимущество магнитных методов измерения перед электрическими бесспорно. Для выполнения магнитных измерений не нужны контакты. С помощью магнитных методов можно изучать эффекты, которые при электрических измерениях искажаются в результате изменения потенциала в месте контакта электрода с кожей.

Магнитные поля возбуждаются токами, величина которых, как правило, больше во внутренних органах человека, чем в кожном покрове. Используя их, можно получить информацию о деятельности внутренних органов, не искаженную влиянием более слабых токов, протекающих в промежуточной области.

Существуют и другие измерительные приборы, основанные на сверхпроводимости.

Исследователи получили возможность изучать явления, до сих пор недоступные нашему восприятию из-за недостаточной чувствительности существующих приборов.

«Наука начинается там, где начинают измерять», — писал выдающийся русский ученый Д. И. Менделеев.



Морская богиня Фетида, мать храбрейшего из героев Троянской войны — Ахиллеса, как повествует древнегреческий миф, допустила роковую оплошность.

Желая сделать сына бессмертным, она окунула его в священные воды Стикса. Однако пятка, за которую Фетида его держала, осталась уязвимой. Ахиллес погиб от стрелы Париса, поразившей его пятку. Отсюда выражение «ахиллесова пята» означает: уязвимое место.

Ахиллесовой пятой сверхпроводников была необходимость охлаждать их до немыслимо низких температур с помощью жидкого гелия.

Создав сверхпроводники, способные «жить» в жидком азоте, ученые преодолели эту «оплошность» природы.

Применение керамических высокотемпературных сверхпроводников в технике сильных токов пока ограничено из-за сравнительно небольшой плотности критического тока и недостаточно отработанной технологии изготовления из них проводов и кабелей.

Но для использования сверхпроводников, охлаждаемых жидким азотом, в приборах на слабосвязанных сверхпроводниках и в вычислительной технике практически никаких ограничений нет. Технология изготовления сверхпроводящих керамических пленок освоена достаточно хорошо.

Созданы опытные образцы сквидов и других приборов, основанных на эффекте Джозефсона, охлаждаемых уже жидким азотом. Примечательно, что жидкий азот в них выполняет двойную функцию: охлаждает проводник до состояния сверхпроводимости и снижает уровень шумов.

Известно, что все основные элементы и узлы суперкомпьютеров нового поколения на слабосвязанных сверхпроводниках уже разработаны. Единственное серьезное препятствие для внедрения — непомерно высокая цена и технические трудности, связанные с необходимостью охлаждения жидким гелием. Те же самые элементы и узлы при замене ниобия иттрий — бариевой или висмутовой керамикой смогут успешно действовать в жидком азоте.

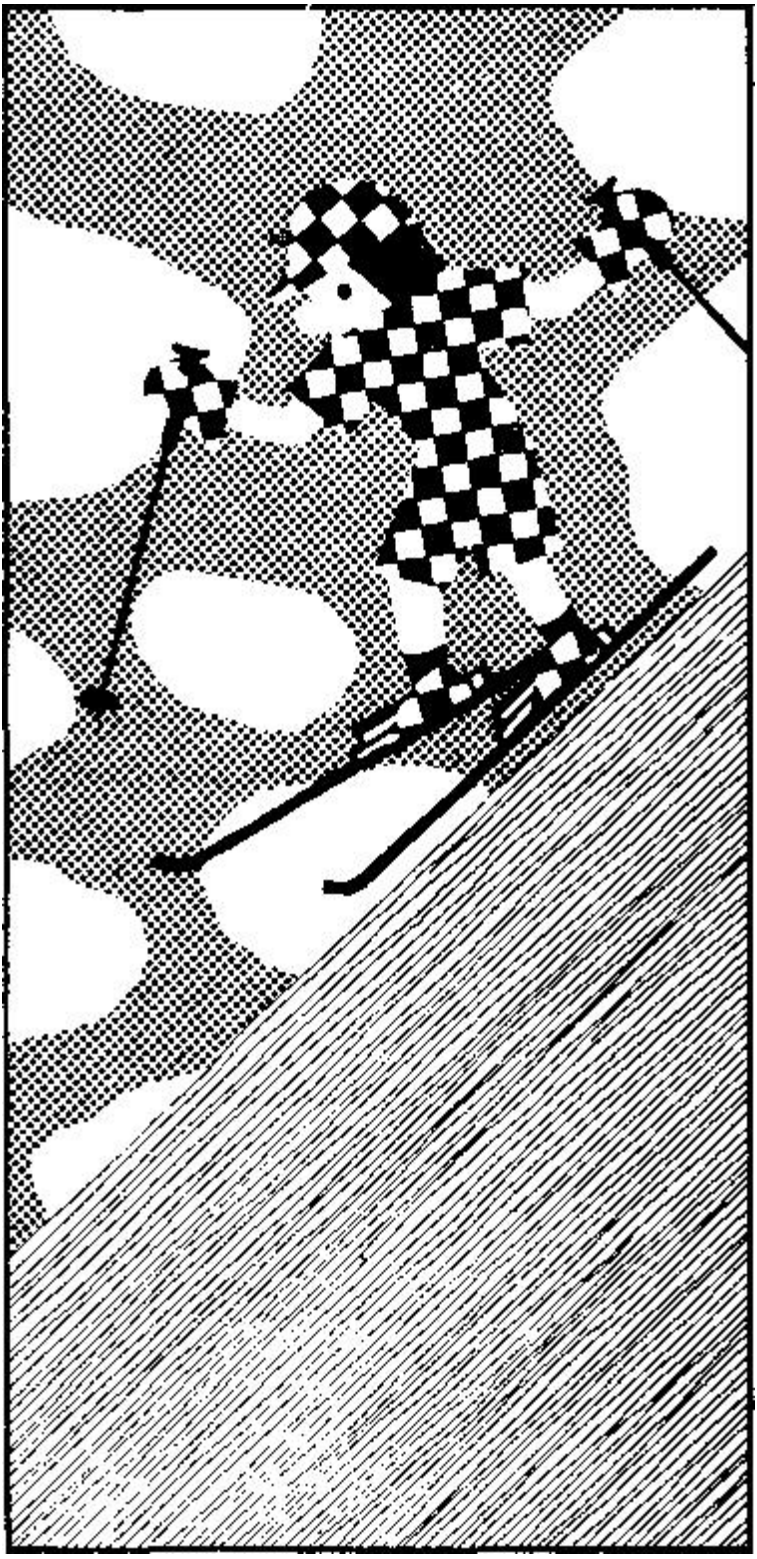
Американские ученые установили, что по сверхпроводящей линии связи, на основе пленок из иттрий — бариевой керамики, информация может передаваться со скоростью тысяча миллиардов бит в секунду. Это значит, что быстродействие ЭВМ повысится в тысячи раз.

По прогнозам специалистов, промышленное изготовление силовых сверхпроводящих проводов и кабелей, охлаждаемых жидким азотом для использования в электротехнике и мощных сверхпроводящих устройствах, удастся освоить уже в ближайшее время.

Тогда «летящие» железнодорожные составы и океанские лайнеры, а также многие другие устройства, связанные с использованием сверхпроводимости, станут обыденным явлением. Всего один час понадобится, например, для поездки на магнито- плане из Москвы в Ленинград, то есть такое же время, которое мы сейчас затрачиваем только для того, чтобы добраться до аэродрома.

Теоретически магнитоплан, помещенный в вакуумированный трубопровод, может развить скорость, сопоставимую с космической… Эта идея легла в основу разрабатываемого в США проекта «Планетран». Предлагается соединить подобным вакуумированным тоннелем оба американских побережья. Разработчики надеются, что поезда смогут развивать скорость до шести километров в секунду. Расстояние от Атлантики до Тихого океана, длиной в несколько тысяч километров, «космический» поезд пролетит за считанные минуты.

И если могут лететь железнодорожные составы, то почему не полететь самому человеку, подобно птице? Об этом люди мечтали еще во времена глубокой древности.



Вообразите гору, покрытую сверхпроводящей пленкой. Вы встаете на лыжи, по внешнему виду напоминающие обычные, но изготовленные из специального магнитного сплава.

Подъемник доставляет вас к исходному пункту сверхпроводящей горнолыжной трассы. Оттолкнувшись палками, вы отрываетесь от земли и с захватывающей дух скоростью летите над склоном горы, словно у вас за спиной выросли крылья.

Такой проект уже сегодня технически вполне осуществим, но требует слишком больших затрат.

Однако когда будет освоена сверхпроводимость при комнатной температуре, станут реальными самые дерзновенные проекты.

Гигантские термоядерные реакторы со сверхпроводящими магнитами смогут вырабатывать электрическую энергию из морской воды, и эта энергия будет передаваться по подземным сверхпроводящим электрическим кабелям в самые отдаленные местности без потерь. Избыток дешевой энергии породит изобилие материальных благ, производимых на полностью автоматизированных фабриках и заводах, оснащенных сверхпроводящими гибкими производственными системами.

Сверхпроводящие суперкомпьютеры новейшего поколения, обладающие феноменальным быстродействием, практически неограниченной памятью, способные выполнять интеллектуальные функции, помогут ученым и инженерам решать в кратчайшие сроки сложнейшие научно — технические задачи.

Очистительные установки со сверхпроводящими магнитами образуют непреодолимые барьеры вредным веществам промышленных стоков. Высокоскоростные бесшумные сверхпроводящие электробусы и электромобили заменят автомашины с бензиновыми двигателями, засоряющие атмосферу выхлопными газами. Воздух и вода планеты обретут первозданную чистоту.

Магнитные сверхпроводящие экраны защитят жителей обитаемых спутников Земли от мощных всплесков потоков заряженных частиц из космоса.

Сверхпроводимость явится одной из важнейших основ техники грядущего общества.

И уже сегодня в замечательных сверхпроводящих устройствах, о которых рассказано в книге, угадываются контуры научно — технической революции новой эры цивилизации.

notes

Примечания

1

1 атмосфера = 101,3 килопаскалей.

2

Сосуды Дьюара используются и для хранения веществ при температуре более высокой, чем окружающая среда. Так, распространенные в быту термосы представляют собой стеклянные сосуды Дьюара, заключенные в металлическую или пластмассовую оболочку.

3

Изотермой принято называть кривую, изображающую зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре.

4

Пуаз — единица измерения динамического коэффициента вязкости (коэффициента внутреннего трения). Вязкость воды при 20 °C равна одной сотой пуаза.

Бессараб М. Страницы жизни Ландау. Изд — во «Московский рабочий», М., 1971.

1 гаусс = 0,0001 тесла.